



2026

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 1

**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

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



*В.Н. Пугач – ректор
Вятского государственного университета*

Вятский государственный университет (ВятГУ) – крупнейший вуз Кировской области, расположенный в центральной части России. Первый его институт был основан более 110 лет назад, в 1914 году. За это время в вузе получили образование сотни тысяч выпускников, многие из которых сегодня занимают ответственные должности на производстве, в органах власти, бизнес-структурах и других сферах деятельности. Сегодня в университете обучаются более 15 тысяч студентов из 45 регионов России и 33 стран мира.

ВятГУ входит в 100 лучших вузов России и 30 лучших вузов России по качеству образования в Национальном рейтинге университетов.

В 2021 году ВятГУ стал участником программы академического лидерства Министерства науки и высшего образования РФ «Приоритет-2030». Цель этой программы – сформировать большую группу вузов по всей России, которые станут лидерами в создании разработок и технологий для внедрения в экономику и соци-

альную сферу, направленных на повышение привлекательности жизни и работы в регионах.

В рамках программы «Приоритет-2030» сотрудниками университета успешно реализуется стратегический технологический проект «Материалы и технологии электрохимической энергетики», обеспечивающий лидерство в области высокоэффективных и экологически безопасных технологий генерации и накопления энергии. Вместе с промышленными партнёрами вуз разрабатывает и внедряет новые материалы и технологии для двух ключевых направлений: литий-ионных аккумуляторов и твёрдооксидных топливных элементов.

Основа научного потенциала университета – талантливые учёные, глубокие и разносторонние люди, которым под силу сложные научные задачи, в том числе междисциплинарного характера. «Мы формируем будущее» – такой девиз Вятского государственного университета, который в полной мере отвечает результатам работы вуза.



**Теоретическая
и прикладная
ЭКОЛОГИЯ**
№ 1, 2026
<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 (№ 2726 по состоянию на 17.02.2026).

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 М.Л. Сазанова, 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,
Е.А. Домнина, к.б.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
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: 610000, Кировская область, г. Киров, ул. Свободы, 67. Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, перевод – Мария Сазанова, фотографии на 1-й и 4-й обложках – Александр Широких, администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман, выпускающий редактор – Мария Зелаева.

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

Дата выхода номера: 25.03.2026.

Тираж 250 экз. Заказ № 0152. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография» Адрес типографии: 610046, Кировская область, г. Киров, ул. Труда, 84а

12+

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор, научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Т.К. Головки д.б.н., профессор, главный научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
Е.В. Дабах к.б.н., доцент, старший научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
М. Ж. Журинов д.х.н., академик НАН Республики Казахстан, профессор, президент НАН РК, генеральный директор АО «ИТКЭ имени Д.В. Сокольского»
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
А.В. Кучин д.х.н., академик РАН, профессор, главный научный сотрудник Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
В.Н. Лаженцев д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
В.З. Латыпова д.х.н., член-корр. РАН, профессор, профессор Казанского федерального университета
Ли Юй д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор Института микологии Цзилиньского аграрного университета
С.Г. Литвинец 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
Н.А. Манучарова д.б.н., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
О.М. Масловский д.б.н., зав. лабораторией Института экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича НАН Беларуси
В.П. Мешалкин д.т.н., академик РАН, профессор, директор Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики (НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
А.А. Москалёв д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН, директор Института долголетия с клиникой превентивной медицины и реабилитации РНЦХ им. акад. Б. В. Петровского
Л.Н. Ольшанская д.х.н., профессор, профессор Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.
С.В. Пестов к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
В.С. Петросян д.х.н., профессор, заслуженный профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
В.Д. Поликсенова к.с.-х.н., доцент, доцент Белорусского 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
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., профессор, профессор Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Е.И. Тихомирова д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.
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»
В.В. Ширяев д.б.н., с.н.с., в.н.с. ВНИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова
Л.Г. Шихова д.с.-х.н., профессор, ведущий научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
В.Т. Юнглод д.и.н., профессор, президент Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 1, 2026

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 M.L. Sazanova,

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

Technical Secretaries:

T.I. Kutyavina, PhD in Biology,

Senior Researcher of Vyatka State University,

E.A. Domnina, PhD in Biology,

Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS

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, 610000. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Mariya Sazanova.

Photo 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".

12+

Release date: March 25, 2026.

Circulation 250 copies. Order No. 0152. Free price.

"Kirov digital printing house", LTD

Printing Address: 84a, Truda St., Kirov, Russia, 610046

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
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- 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.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Professor, Leading Researcher of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyyets** 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
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Chief Researcher 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 RAS, 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
- N.A. Manucharova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- O.M. Maslovsky** Doctor in Biology, Head of Laboratory of V.F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus
- 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.A. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Director of the Longevity Institute with the Clinic of Preventive Medicine and Rehabilitation of the Russian Scientific Center of Surgery named after Academician B.V. Petrovsky
- L.N. Olshanskaya** Doctor in Chemistry, Professor, Professor of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Professor Emeritus of Lomonosov Moscow State University
- V.D. Poliksenova** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Belarusian 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
- 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, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov
- 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"
- V.V. Shiryayev** Doctor in Biology, Senior Researcher, Leading Researcher of Professor Zhitkov Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming
- L.N. Shikhova** Doctor in Agricultural Sciences, Professor, Leading Researcher of Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина, Д. В. Демидов**
Дефицит селена в почвах и способы его коррекции 6

СТАТЬИ

- Т. А. Пристова** Запасы углерода в надземной части древостоя экспериментальных культур сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) в условиях средней тайги Республики Коми 19
- Т. I. Zyubanova, O. M. Minaeva, E. E. Akimova, N. N. Tereshchenko** Effects of *Eisenia fetida* population size on *Lactuca sativa* growth and productivity in model ecosystems 27
- М. В. Макаров, Р. Е. Белогурова** Макрозообентос в различных биотопах вершины бухты Круглой (Чёрное море, Крымский полуостров) 36
- Н. В. Василевская, П. В. Осечинская** Тератоморфизм пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного загрязнения городской среды 47
- N. V. Pakharkova, I. G. Gette, N. A. Gaevsky, E. G. Rudikovskaya, A. V. Rudikovskii, I. V. Masentsova, A. A. Kalabina, V. L. Gavrikov** Seasonal changes in chlorophyll fluorescence to assess the stress tolerance of Siberian pines at treeline 56
- Н. А. Уланов, А. Н. Уланов** Непроизводственные биологические ресурсы постболотных лесолуговых агроландшафтов 65
- В. И. Пономарёв, О. А. Лоскутова, О. Н. Кононова, Т. А. Кондратьева** Сравнительная характеристика разнообразия фауны водораздельных озёр центральной части Большеземельской тундры 77
- С. Ф. Шаяхметов, А. В. Меринов, О. М. Журба, А. Н. Алексеенко** Аккумуляция тяжёлых металлов в компонентах природной среды на территории накопленной техногенной нагрузки 88
- Т. Д. Шабутдинов, Р. Ф. Абдрахманов, А. О. Полева, В. Н. Дурнаева** Геохимия подземных вод Зилаирского бассейна Уральской гидрогеологической складчатой области (Южный Урал) 96
- А. В. Сазанов, А. А. Алалыкин, М. Л. Сазанова, М. Ю. Милославский** Оценка содержания гинзенозидов с антиоксидантной активностью в экстрактах из белого женьшеня 105
- Е. В. Калинина, Л. В. Рудакова, А. А. Трефилова** Биологическая очистка производственных сточных вод с использованием носителей из вторичных ресурсов 113
- С. Л. Фукс, К. О. Камалов** Инновационный подход к созданию композитных покрытий с применением вторичных ресурсов промышленности 124
- В. В. Цыганов, А. К. Еналеев, С. А. Савушкин** Механизм согласованной экологизации эксплуатируемых тепловозов 134
- Е. А. Татаринцева, Л. Н. Ольшанская** Изучение возможности использования композиционных сорбентов для очистки вод от нефтепродуктов при пониженных температурах 145
- А. В. Шиляев, И. Д. Трошкина** Получение безводного нитрата кальция и кристаллического сульфата аммония из отхода производства фосфорных удобрений 154

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ
И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ.
МОДЕЛИ
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА

РЕМЕДИАЦИЯ
И РЕКУЛЬТИ-
ВАЦИЯ

О. З. Еремченко, Е. Е. Малышкина, И. В. Пахорук Распространение солеустойчивой растительности в поймах при техногенном засолении почв 161

ЭКОТОКСИ-
КОЛОГИЯ

К. В. Золотарёв, А. Н. Михайлов, М. В. Михайлова, В. И. Наход, Д. Д. Жданов Тканеспецифичная экспрессия генов транспортных белков у обыкновенного карпа (*Cyprinus carpio*) под воздействием ионов кадмия 169
V. I. Starichenko Assessment of the hereditary component of fluoride ecotoxic load 177

ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ

Г. Л. Накул Параметры осенней миграционной остановки молодых зябликов (*Fringilla coelebs* Linnaeus, 1758) в восточной части Русской равнины 189
Т. А. Сизоненко, Д. М. Шадрин Эктомикоризные симбионты и морфоанатомическое строение корневых окончаний *Pinus sylvestris* L. на вырубках сосняка черничного средней тайги Республики Коми 199
А. И. Коротких, Л. В. Кондакова, Л. И. Домрачева, Т. Я. Ашихмина Биоплёнки *Nostoc commune* как феномен многолетней природной вегетации в техногенной среде 209
И. П. Вознячук, Н. Д. Грищенко, Н. Л. Вознячук Мониторинг популяции прибрежницы одноцветковой и среды её произрастания в озере Свитязь (Республика Беларусь) 217

ЭКОЛОГИЯ
И КЛИМАТ

Е. В. Каранина, В. Н. Пугач, А. В. Котанджян Поддержание экологических инициатив коммерческими банками России в рамках реализации принципов экологической, социальной и корпоративной ответственности 227

ИНФОРМАЦИЯ

Е. В. Лелекова О биологическом разнообразии растений научно-образовательного центра «Ботанический сад» Вятского государственного университета 237
Т. Я. Ашихмина Межпредметность как фактор повышения качества образования 241

CONTENTS

REVIEWS

N. V. Syrchina, L. V. Pilip, T. Ya. Ashikhmina, D. V. Demidov Selenium deficiency in soils and methods for its correction 6

ARTICLES

T. A. Pristova Carbon stocks in the aboveground phytomass of experimental plantation of longepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) in the middle taiga of the Komi Republic 19
T. I. Zyubanova, O. M. Minaeva, E. E. Akimova, N. N. Tereshchenko Effects of *Eisenia fetida* population size on *Lactuca sativa* growth and productivity in model ecosystems 27
M. V. Makarov, R. E. Belogurova Macrozoobenthos in various biotopes of the head of Kruglaya Bay (the Black Sea, Crimea) 36
N. V. Vasilevskaya, P. V. Osechinskaya *Pinus sylvestris* L. pollen teratormorphism under conditions of industrial pollution of the urban environment 47
N. V. Pakharkova, I. G. Gette, N. A. Gaevsky, E. G. Rudikovskaya, A. V. Rudikovskii, I. V. Masentsova, A. A. Kalabina, V. L. Gavrikov Seasonal changes in chlorophyll fluorescence to assess the stress tolerance of Siberian pines at treeline 56
N. A. Ulanov, A. N. Ulanov Non-productive biological resources in post-bog forest-meadow agricultural landscapes 65

THEORETICAL
PROBLEMS
OF ECOLOGY

METHODOLOGY
AND RESEARCH
METHODS.
MODELS AND
FORECASTS

MONITORING OF
NATURAL AND
ANTHROPO-
GENICALLY
DISTURBED AREAS

	<i>V. I. Ponomarev, O. A. Loskutova, O. N. Kononova, T. A. Kondratjeva</i> Comparative study of the Bolshezemelskaya tundra central part watershed lakes fauna diversity 77	
	<i>S. F. Shayakhmetov, A. V. Merinov, O. M. Zhurba, A. N. Alekseenko</i> Heavy metal accumulation in the natural environment components in the territory of accumulated technogenic load 88	
CHEMISTRY OF NATURAL ENVIRONMENTS AND OBJECTS	<i>T. D. Shabutdinov, R. F. Abdrakhmanov, A. O. Poleva, V. N. Durnaeva</i> Geochemistry of the Zilair basin groundwater in the Ural hydrogeological folded region (Southern Urals) 96	
	<i>A. V. Sazanov, A. A. Alalykin, M. L. Sazanova, M. Yu. Miloslavskiy</i> Assessment of antioxidant ginsenosides content in white ginseng extracts 105	
ECOLOGIZATION OF PRODUCTION	<i>E. V. Kalinina, L. V. Rudakova, A. A. Trefilova</i> Biological treatment of industrial wastewater using carriers from secondary resources 113	
	<i>S. L. Fuchs, K. O. Kamalov</i> An innovative approach to the composite coatings creation using industrial waste resources 124	
	<i>V. V. Tsyganov, A. K. Enaleev, S. A. Savushkin</i> Mechanisms for coordinated ecologization of operational diesel locomotives 134	
	<i>E. A. Tatarintseva, L. N. Olshanskaya</i> Study of the possibility of using composite sorbents to purify water from oil products at low temperatures 145	
	<i>A. V. Shilyaev, I. D. Troshkina</i> Calcium nitrate anhydrous and ammonium sulfate crystalline obtaining from phosphate fertilizers wastes 154	
REMEDICATION AND RECULTIVATION	<i>O. Z. Eremchenko, E. E. Malyshkina, I. V. Pakhorukov</i> Salt-tolerant plant distribution within floodplain ecosystems due to technogenic soil salinization 161	
ECOTOXICOLOGY	<i>K. V. Zolotarev, A. N. Mikhailov, M. V. Mikhailova, V. I. Nakhod, D. D. Zhdanov</i> Cd ²⁺ -induced tissue-specific expression of genes involved in cellular transportation in Eurasian carp (<i>Cyprinus carpio</i>) 169	
	<i>V. I. Starichenko</i> Assessment of the hereditary component of fluoride ecotoxic load 177	
POPULATION ECOLOGY	<i>G. L. Nakul</i> Parameters of autumn migratory stopover of young chaffinches (<i>Fringilla coelebs</i> Linnaeus, 1758) in the Eastern Russian Plain 189	
	<i>T. A. Sizonenko, D. M. Shadrin</i> Ectomycorrhizal symbionts and morpho-anatomical structure of <i>Pinus sylvestris</i> L. fine roots in clear-cuts of blueberry pine forests, middle taiga, the Komi Republic 199	
	<i>A. I. Korotkikh, L. V. Kondakova, L. I. Domracheva, T. Ya. Ashikhmina</i> <i>Nostoc commune</i> biofilms as a phenomenon of perennial natural vegetation in a technogenic environment 209	
	<i>I. P. Voznyachuk, N. D. Hryshchankava, N. L. Voznyachuk</i> Monitoring of the <i>Littorella uniflora</i> population and its habitat in Lake Svityaz (Republic of Belarus) 217	
ECOLOGY AND CLIMATE CHANGE	<i>E. V. Karanina, V. N. Pugach, A. V. Kotandzhyan</i> Supporting environmental initiatives by Russian commercial banks within the framework of implementing the principles of environmental, social and corporate responsibility 227	
INFORMATION	<i>E. V. Lelekova</i> About the biological diversity of plants of the scientific and educational center “Botanical Garden” of Vyatka State University 237	
	<i>T. Ya. Ashikhmina</i> Interdisciplinarity as a factor in improving the quality of education 241	

Дефицит селена в почвах и способы его коррекции

© 2026. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с., Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
Д. В. Демидов⁴, к. т. н., начальник Центра инноваций,
Дирекция по маркетингу и развитию,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,
³Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
⁴Группа «ФОСАГРО» ОП АО «Апатит»,
119333, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д. 55/1, стр. 1,
e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Специфическими особенностями микроэлемента (МЭ) Se являются чрезвычайно низкие физиологические нормы потребления и узкий интервал между дефицитом и токсичностью. Недостаток селена в организме приводит к нарушению здоровья и сокращению продолжительности жизни. Основным источником Se для растений является почва, далее этот элемент передаётся по пищевым цепям. Концентрация Se в почвах обычно варьирует в пределах от 0,01 до 2,0 мг/кг при среднем глобальном значении 0,4 мг/кг. Большинство почв сельскохозяйственного назначения характеризуются выраженным дефицитом Se. Обогащение почв этим МЭ позволяет не только повысить содержание Se в сельскохозяйственной продукции, но и увеличить продуктивность агроценозов, снизить патогенную нагрузку на растения, повысить их стрессоустойчивость. Для обогащения почв могут найти применение Se-содержащие удобрения. Наиболее безопасными считаются удобрения, содержащие Se в виде органических соединений или биоформ, однако производство таких удобрений сопряжено с относительно высокими затратами. Чаще всего в качестве источника Se для растений применяют селенат натрия, его недостатком является высокая токсичность, ограничивающая возможность использования в сельском хозяйстве. Более безопасными считаются обогащённые Se комплексные удобрения. Производство и вывод на рынок доступных и эффективных Se-удобрений имеют большое социальное значение, однако технологические аспекты производства таких удобрений в научных публикациях не нашли должного отражения. Вопросы, касающиеся оптимальных норм внесения Se в почвы, до настоящего времени также не получили однозначного решения. В разных публикациях приводятся данные о достижении положительного эффекта при внесении от 4 до 200 г Se на га под одну и ту же культуру. Дискуссионными являются вопросы, касающиеся оценки экологических рисков от масштабного использования Se-удобрений, однако в ряде публикаций приводятся сведения о том, что Se, благодаря образованию летучих соединений, не аккумулируется почвами и практически не мигрирует в подземные воды.

Ключевые слова: селен, микроэлементы, почвы, удобрения, биодоступность селена.

Selenium deficiency in soils and methods for its correction

© 2026. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760, L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146,
T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047, D. V. Demidov⁴ ORCID: 0009-0002-0971-9110,
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Ave., Kirov, Russia, 610017,
³Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
⁴PHOSAGRO GROUP, Company Apatit,
55/1, Bldg. 1, Leninskiy Ave., Moscow, Russia, 119333,
e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Micronutrient Se is characterized by extremely low physiological requirements and a narrow threshold between deficiency and toxicity. Selenium deficiency leads to poor health and shortened lifespan. Soil is the primary source of Se for plants, and this element is then passed along the food chain. Most agricultural soils are characterized by a significant Se deficiency. Enriching soils with this micronutrient not only increases Se-content in agricultural products but also enhances the productivity of agrocenoses, reduces pathogen load on plants, and improves their stress resistance. Se-containing fertilizers can be used to enrich soils. Fertilizers containing Se in organic form or bioform are considered the safest, however, the production of such fertilizers is relatively expensive. Sodium selenate is most often used as a source of Se for plants. High toxicity is its disadvantage limiting its use in agriculture. Commercial forms of combined fertilizers enriched with Se are considered safer. The production and marketing of affordable and effective Se fertilizers is of great social importance. However, the technological aspects of their production have not been adequately addressed in scientific publications. Questions regarding optimal Se application rates to soils have not yet received an acceptable answer. Various publications report positive effects with Se applications ranging from 4 to 200 g/ha for the same crop. Assessing the environmental risks of large-scale Se-fertilizer use is controversial. However, there is evidence that due to volatile compounds formed, Se does not accumulate in soils and virtually does not migrate into groundwater.

Keywords: selenium, micronutrients, soils, fertilizers, selenium bioavailability.

Селен входит в число микроэлементов (МЭ), играющих важную роль в поддержании метаболического, иммунного, эндокринного и клеточного гомеостаза. Это единственный обнаруженный в белках МЭ, который генетически закодирован в форме 21-й нестандартной аминокислоты (АК) селеноцистеина (SeCys), образующей активные центры белков селенопротеинов [1, 2]. Основной пищевой формой Se, обеспечивающей потребность человека в этом МЭ, считается биологически активный L-энантиомер Se-метионин (SeMet). Соответствующая АК обычно встречается в сое, зерновых, пастбищных бобовых, бразильских орехах [3]. Направление воздействия Se на организм (вред/польза) определяется уровнем его потребления, при этом взаимосвязь между продолжительностью жизни и содержанием МЭ в рационе имеет чёткую U-образную форму. В отличие от большинства других МЭ, для Se характерен чрезвычайно узкий интервал между дефицитом и токсичностью, что обуславливает необходимость тщательного регулирования потребления этого МЭ с пищей и водой [4]. Физиологическая потребность в Se для женщин (мкг/сутки) составляет 55, для мужчин – 70, для детей – от 10 до 50 (в зависимости от возраста) [5]. Снижение содержания Se в суточном рационе взрослого человека до 40 мкг приводит к развитию селенодефицитных состояний, а превышение безопасного уровня вызывает хроническую токсичность. Научный комитет по пищевым продуктам (Scientific Committee on Food, SCF) в 2000 г. установил верхнюю безопасную норму потребления Se из всех источников пищи, включая пищевые добавки, для взрослого населения на уровне 300 мкг/день. Позднее эти нормативы были скорректированы в сторону увеличения (до 400–450 мкг в день) [6].

Вариабельность селенового статуса населения в значительной мере определяется геохимической неоднородностью территории в сочетании с антропогенным влиянием на распределение этого МЭ в окружающей среде (ОС) и комплексом социальных факторов (в частности, характером питания) [7, 8]. Согласно данным Российской академии медицинских наук, более половины жителей России имеют явный дефицит Se. В экологически неблагоприятных по этому показателю районах глубина дефицита достигает 95–100 % [9–11]. Дефицит Se приводит к снижению иммунитета, нарушению метаболизма, репродуктивных и когнитивных функций, мышечной слабости, развитию онкологических заболеваний, патологий печени, сердечно-сосудистой системы, щитовидной железы, ухудшению состояния кожи. Выраженный дефицит Se на фоне дисбаланса других МЭ является причиной развития опасных эндемических заболеваний сердца (болезнь Кешана), костей и суставов (болезнь Кашина-Бека), мышц (беломышечная болезнь животных) [12–14].

Не менее разрушительно для здоровья и избыточное потребление Se, вызывающее нарушение иммунитета, репродуктивной функции, нормальной работы желудочно-кишечного тракта, выпадение волос, неврологические расстройства, развитие сахарного диабета, сокращение продолжительности жизни [15–19]. Разные формы Se проявляют различную токсичность. Неорганические соединения более токсичны, чем органические. Токсичность протеиногенного SeCys выше, чем характерного для растений SeMet. Наименее токсичными считаются наночастицы Se [20].

Узкий интервал между дефицитом и токсичностью существенно затрудняет возможность использования обогащённых Se

биологически-активных добавок для коррекции недостатка МЭ в питании населения. Более перспективным может стать подход, базирующийся на обогащении бедных Se почв с помощью удобрений. Соответствующие технологии успешно апробированы в ряде стран и регионов. Накопленный в этом отношении опыт заслуживает тщательного изучения и критической оценки. Всестороннее исследование и понимание региональных и глобальных закономерностей распределения Se в ОС и транслокации его в экосистемах имеет решающее значение для успешного решения проблем общественного здравоохранения, обусловленных дисбалансом этого МЭ.

Цель работы – выявить достигнутый уровень научных знаний и отразить актуальное состояние проблемы восполнения дефицита Se в почвах сельскохозяйственного назначения, а также рассмотреть и критически оценить опубликованные данные, касающиеся экологических аспектов использования Se-содержащих удобрений.

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой систематизированный обзор русскоязычных и англоязычных научных публикаций, посвящённых вопросам дефицита Se в почвах, сельскохозяйственном сырье и пищевых продуктах, а также перспективным способам коррекции соответствующего дефицита. Основное внимание уделено таким вопросам, как содержание Se в почвах, его биодоступность, особенности Se-содержащих удобрений. В обзор включены монографии и статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях в период с 1993 по 2026 гг. Для поиска информации использовали сервисы Академия Google, Google Scholar, Scopus, Web of Science, Scholar.ru, КиберЛенинка, eLIBRARY. Поиск источников охватывал такие дисциплины, как медицина, ветеринария, агрохимия, растениеводство, экология, химия продовольственного сырья и пищевых продуктов. Структурирование информационного поля и классификацию данных выполняли на основе результатов контентного анализа источников. Для отбора публикаций применяли ключевые слова: селен, микроэлементы, почвы, дефицит селена, удобрения с селеном, микроудобрения, транслокация селена, а также ключевые слова из научных публикаций близкой тематики. Для поиска глобальных данных ключевые слова вводили в поисковые системы на английском языке, для

поиска локальной информации – на русском. Работа с источниками включала определение релевантности, сопоставление и критический анализ опубликованных данных из разных источников, группировку информации по темам, объединение данных в единую картину.

Селен в почвах

Почвы являются основным источником Se для растений [21]. По пищевым цепям этот элемент передается животным и человеку. В живых организмах Se преимущественно входит в состав белков селенопротеинов, Se-содержащих АК и пептидов, незначительная доля присутствует в виде неорганических селенидов (Se^{2-}), селенитов (SeO_3^{2-}) и селенатов (SeO_4^{2-}) [22, 23]. В почвах, в зависимости от условий, Se может находиться в форме селенатов, селенитов, селенидов, органических соединений, а также элементарного селена (Se^0) [24]. Согласно экотоксикологическим характеристикам, содержащийся в почве Se является сильноопасным элементом [25], однако значения ПДК этого элемента в почвах РФ до настоящего времени не установлены (СанПиН 1.2.3685-21).

Селен относится к числу рассеянных элементов, он содержится в виде примесей в сульфидных, фосфоритных, урановых, молибденовых рудах и не образует собственных крупных месторождений. Минералы Se встречаются очень редко и обычно представляют собой селениды меди, никеля, серебра, ртути [26, 27]. Среднее содержание Se в верхней части континентальной коры оценивается в $1,5 \cdot 10^{-5} \%$ (150 мкг/кг). Наиболее богаты этим элементом породы осадочного происхождения, содержащие в среднем $2,7 \cdot 10^{-5} \%$ (270 мкг/кг) Se [28].

Накопление Se в почвах происходит благодаря естественным процессам выветривания материнских пород и атмосферного осаждения вулканических шлейфов [29]. Значительное влияние на содержание этого элемента в почве оказывает деятельность человека. К антропогенным источникам, увеличивающим содержание Se в почве и атмосфере, можно отнести металлургию, угольную промышленность, электронику, производство стекла, сельское хозяйство (применение кормовых добавок, Se-содержащих пестицидов и удобрений). По имеющимся оценкам в результате хозяйственной деятельности в атмосферу попадает около 37–40 % от общего объема выбросов селена [30, 31]. Сочетанное воздействие естественных

и антропогенных факторов приводит к весьма неоднородному распределению данного химического элемента в ОС.

Концентрация Se в почвах обычно варьирует в пределах от 0,01 до 2,0 мг/кг при среднем глобальном значении 0,4 мг/кг, однако некоторые территории характеризуются аномально высоким содержанием этого элемента (более 5 мг/кг) [32]. Почвы таких территорий в основном образуются на богатых Se материнских породах. Повышенное содержание Se характерно для углеродистых и кремнистых сланцев, природных фосфатов, ископаемых углей, сульфидных руд. Содержание Se в самородной сере и сульфидных минералах может достигать 200 мг/кг. Почвы с низким содержанием Se чаще всего формируются на кислых материнских породах. Дефицитные по Se почвы распространены значительно шире, чем почвы с высоким содержанием этого элемента [33].

Накоплению Se в почве способствуют процессы сорбции, осаждения, образования малоподвижных комплексных соединений и биоаккумуляции. Количество почвенного Se обычно положительно коррелирует с количеством органического вещества. Высокое содержание органических веществ способствует аккумуляции и снижению мобильности данного МЭ. В бедных органикой дерново-подзолистых почвах и почвах песчаного состава концентрация Se, как правило, не превышает 0,1 мг/кг. В суглинистых и глинистых почвах его содержание выше. При увеличении количества гумуса на 1 % валовое содержание Se возрастает на 9,8 мкг/кг. [29]. В относительно богатом органическими соединениями поверхностном слое почвы концентрация Se выше, чем в более глубоких слоях. Следует отметить, что концентрация данного элемента имеет выраженную положительную корреляцию не только с содержанием органического углерода, но и с содержанием серы. Связь между накоплением Se и pH почвы весьма незначительна [34].

Для характеристики уровня Se в почвах приняты следующие пороговые значения концентрации: менее 125 мкг/кг – область селенодефицита; 125–175 мкг/кг – маргинальная недостаточность; 175–3000 мкг/кг – область оптимума; более 3000 мкг/кг – область избытка [35–37]. Более детальный подход к градации Se в верхних горизонтах почвы предлагают китайские учёные: <0,125 мг/кг – дефицит; 0,125–0,175 мг/кг – потенциальный дефицит; 0,175–0,300 мг/кг – достаточное

содержание; 0,3–0,4 мг/кг – потенциальное обогащение; 0,4–3,0 мг/кг – обогащение; >3 мг/кг – токсичность. Целесообразность соответствующей детализации обусловлена тем, что содержание Se >0,3 мг/кг обеспечивает стабильную урожайность богатого этим элементом риса [38].

Биодоступность селена в почвах

Взаимосвязь между содержанием Se в почве и сельскохозяйственных культурах весьма сложна и неоднозначна. Накопление Se в конкретных сельскохозяйственных культурах зависит не столько от общего содержания этого элемента в субстрате, сколько от его подвижности и биодоступности. Выявление факторов, оказывающих влияние на мобильность Se в почве и доступность для растений, позволяет регулировать его содержание в растениеводческой продукции и обеспечивать необходимый результат в стратегиях биофортификации и фиторемедиации. Водорастворимые, ионообменные и связанные с оксидами железа/марганца формы Se отличаются наибольшей биодоступностью [39, 40].

Значительное влияние на подвижность и биодоступность Se оказывают такие характеристики почвы, как гранулометрический состав, влажность, pH, окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), содержание и состав органического вещества, содержание полуторных оксидов, оксидов Mn, тяжёлых металлов (ТМ), концентрация ионов-конкурентов (PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , NO_3^-), а также почвенная микробиота [41–44]. Сочетанное воздействие комплекса различных факторов существенно затрудняет возможность корректной оценки вклада каждого из них в процессы иммобилизации/мобилизации Se.

К характерным особенностям Se относится выраженная способность активно участвовать в окислительно-восстановительных процессах. По строению внешнего электронного уровня Se аналогичен S, однако валентные электроны этого элемента связаны с ядром значительно слабее, что облегчает процесс окисления. Вместе с тем, благодаря ограниченной способности к образованию π -связей, окисленные формы Se оказываются менее стабильными, чем окисленные формы S и в восстановительной среде степень окисления Se легко уменьшается [45, 46]. В результате протекающих в природных средах химических, физических и биологических процессов данный элемент активно переходит из одного

валентного состояния в другое. Динамика глобального круговорота, формы и общее содержание Se в ОС в настоящее время являются предметом пристального интереса учёных [47]. Согласно опубликованным данным, в щелочных и нейтральных почвах, характеризующихся высокими значениями ОВП (окислительные условия), преобладающей формой Se является селенат. Селенаты хорошо растворимы в воде, проявляют низкую способность к адсорбции и осаждению и быстро усваиваются растениями [48]. В интервале умеренных значений ОВП основной формой Se в почвах является селенит, подвижность которого определяется процессами сорбции/десорбции на различных твёрдых поверхностях, в частности, на оксидах и гидроксидах металлов, глинистых частицах, органических материалах. Следует отметить, что благодаря пирамидальной форме с положительно поляризованным атомом Se в вершине, способность к адсорбционному связыванию и комплексообразованию у селенитов выражена значительно сильнее, чем у селенатов, имеющих форму тетраэдра с положительно поляризованным атомом Se внутри иона [49]. В сильно-восстановительной среде (высокие значения pH и низкий ОВП) Se существует в форме Se (0) или Se (-II) [50].

Значительное влияние на биодоступность и биологические функции Se оказывают ризосферные и микробиологические процессы. Установлено, что корневые экссудаты (в частности комплекс органических кислот), контактирующие с оксидами марганца, способствуют окислению селенитов до селенатов [51]. Почвенные микроорганизмы принимают непосредственное участие в окислении, восстановлении, метилировании и деметилировании Se, активизируя глобальный круговорот данного МЭ. К ключевым микробным таксонам, оказывающим влияние на мобильность Se, продуктивность и здоровье экосистем, следует отнести представителей *Pseudomonas* и *Bacillus* [52].

Метаболическая необходимость Se для высших растений до настоящего времени является предметом активных дискуссий. Установлено, что высокие дозы этого элемента губительны для большинства видов, однако оптимизация селенового статуса позволяет повысить стрессоустойчивость растений, вызванную неблагоприятными факторами ОС (засуха, повышенное содержание солей, воздействие ТМ, патогенных микроорганизмов, ультрафиолетового излучения и др.), улуч-

шить минеральное питание, увеличить общую продуктивность и качество урожая [53, 54]. Разные виды растений характеризуются различной способностью к биоаккумуляции Se. Оценка накопления данного элемента в некоторых сельскохозяйственных культурах показала, что по способности поглощать Se из почв изученные культуры можно расположить в следующий ряд: просо > горох > гречиха > овёс [55]. Существуют виды-гипераккумуляторы Se (*Stanleya pinnata*, *Astragalus bisulcatus* и др.), которые активно накапливают данный элемент в своих органах и тканях (до 0,1–1,5 % сухого веса) в количествах, токсичных для других организмов. Высокий уровень токсичного Se защищает растения от поедания травоядными животными, поражения вредителями и патогенными микроорганизмами. Опадшая листва с высоким содержанием Se может подавлять рост соседних неустойчивых к данному элементу видов и стимулировать развитие толерантной к Se биоты [56, 57]. Высокая устойчивость растений-гипераккумуляторов к Se в определённой степени объясняется их способностью накапливать МЭ в виде непротеиновой АК метил-SeCys. Соответствующая АК не входит в состав белков, поэтому и не нарушает их функции, кроме того, метил-SeCys, может быть метаболизирован в растительных клетках до летучего диметилдиселенида и удалён в атмосферу [58].

Существенный вклад в поглощение, распределение и накопление Se в органах и тканях растений вносят некоторые обитающие в ризосфере грибы. Соответствующие аспекты взаимодействия растений с грибами представляют большой научный интерес, так как открывают новые возможности практического использования грибов в биофортификации [59, 60]. Опубликованы результаты исследований, согласно которым комбинированное внесение Se и гриба триходермы (*Trichoderma* spp.) повышает урожайность фасоли обыкновенной *Phaseolus vulgaris* L. [61]. Совместное внесение Se и грибов арбускулярной микоризы оказывает положительное влияние на урожайность и качество лука-шалота *Allium ascalonicum* L. [62].

Поскольку Se является химическим аналогом S, механизмы поглощения и метаболизма этих элементов у большинства растений одинаковы. Неорганические формы Se могут ассимилироваться растениями по пути ассимиляции сульфатов и включаться в состав SeCys, SeMet и некоторых других соединений, аналогичных сероорганическим веществам.

Соответствующий биохимический процесс может быть реализован как в корнях, так и в надземных органах растений. Чрезмерная замена S на Se в цистеине и метионине приводит к нарушению нормальной структуры и функций белков. Снижение токсичного воздействия Se достигается за счёт способности многих растений метаболизировать SeMet в летучий диметилселенид. Вторым возможным механизмом детоксикации Se является расщепление SeCys на элементарный Se и аланин [63, 64].

Se-содержащие удобрения

Биофортификация основных сельскохозяйственных культур (злаков, бобовых, овощных, плодовых, лекарственных) за счёт применения тех или иных форм Se становится одним из трендов современного растениеводства [65, 66]. Устранение дефицита Se в почвах позволяет оптимизировать концентрацию этого МЭ в растительной продукции и, соответственно, в рационе человека, повысить качество урожая, увеличить продуктивность и экологическое состояние агроценозов. Применение Se-содержащих удобрений приводит не только к обогащению продукции этим МЭ, но и к снижению накопления в растениях опасных ТМ, включая Cd и Hg [67–70]. Участие Se в подавлении биоаккумуляции ТМ обусловлено такими механизмами, как образование малорастворимых селенидов, комплексообразование, трансформация ризосферной микробиоты, регуляция внутриклеточного транспорта и накопления ТМ, укрепление корневого барьера за счёт изменения морфологии, снижения проницаемости клеточной стенки и индукции образования железистых отложений на поверхности корней [71]. Использование Se-удобрений повышает устойчивость растений к солевому стрессу и дефициту воды [72, 73].

Несмотря на доказанную эффективность, производство и применение Se-содержащих удобрений сопряжено с определёнными проблемами, обусловленными неравномерным распределением данного элемента в почвенном покрове, узким интервалом между дефицитом и токсичностью, разным уровнем аккумуляции различными культурами, низкими нормами внесения Se, составляющими несколько десятков грамм действующего вещества на га, высокой токсичностью селеновых добавок, необходимостью систематического мониторинга содержания Se в почве и растениеводческой

продукции [74]. Как правило, соединения Se включают в состав комплексных минеральных или органоминеральных удобрений в качестве МЭ. Такая практика имеет большой недостаток, поскольку нормы внесения удобрений рассчитываются на основе содержания в них основных элементов питания (N, P, K), а не МЭ. Немаловажное значение имеют и такие проблемы, как стандартизация Se-удобрений, нормативно-правовые и экономические рамки, регулирующие их использование, оценка рисков безопасности и надзор за обогащённой Se сельскохозяйственной продукцией, разработка системы стандартов для сельскохозяйственных предприятий, использующих Se-содержащие агрохимикаты. Успешное решение этих проблем имеет решающее значение для раскрытия потенциала биофортификации селеном [75–79].

Для обогащения комплексных удобрений Se обычно применяют селениты и селенаты натрия или используют соответствующие соли в качестве самостоятельных микроудобрений. Следует отметить, что агрохимическая эффективность селенатов, включённых в состав гранулированных комплексных удобрений, значительно (в 2–15 раз) ниже, чем эффективность селенатов без добавок. При этом эффективность фолиарных подкормок селеном повышается при их совместном внесении с азотными удобрениями [80]. Внесение селена в форме селенитов или селенатов приводит к повышению уровня подвижного Se в почвах, однако эти формы различаются по характеру иммобилизации, распределению в почвенных фракциях, доступности и накоплению в тканях и органах растений. Экспериментальные исследования показали, что селенаты по сравнению с селенитами способствуют более значительному повышению концентрации биодоступных форм Se и более интенсивному накоплению этого МЭ в растениях [81, 82]. Опыт использования разных соединений Se для подкормки трав на пастбищах в Новой Зеландии показал, что селенат натрия в 4–20 раз менее токсичен для животных, чем селенит, а нормы его внесения для достижения необходимого эффекта в 5 раз меньше, чем для селенита [83]. Вместе с тем для подкормки томатов предпочтительнее использовать селенит натрия, поскольку данная культура более отзывчива именно на эту форму Se [84].

В последние годы был опубликован ряд работ, обосновывающих возможность и целесообразность использования в качестве селеновых удобрений наночастиц элементарного се-

лена (н-Se). К преимуществам данной формы можно отнести высокую эффективность при низких уровнях внесения, пролонгированный период действия, меньшую токсичность для почвенной микробиоты [85–88]. Согласно экспериментальным данным, н-Se, используемый при выращивании пшеницы, превосходит традиционные ионные формы селеновых удобрений по биодоступности на 39,93 %, повышению урожайности на 27,13 %, накоплению крахмала на 20,94 %, концентрации Se в зерне – в 32 раза. При этом эффективность н-Se-удобрений, содержащих более крупные (~210 нм) наночастицы (НЧ) на 59 % выше, чем эффективность удобрений, содержащих мелкие (~60 нм) НЧ [89]. н-Se-удобрения обогащают микробиом ризосферы полезными для растений таксонами и способствуют созданию консорциумов микроорганизмов, подавляющих патогены [90]. Опубликованы данные, согласно которым внекорневое применение н-Se снижает вредоносность *Alternaria solani* на томатах [91], двукратное внесение н-Se-удобрения на стадии рассады значительно снижает индекс поражения картофеля паршой [92], а комбинированное применение н-Se и глутатиона повышает устойчивость огурцов к серой гнили (*Botrytis cinerea*) [93]. Несмотря на растущий интерес к наноудобрениям, остаётся много вопросов к подтверждению безопасности и оценке возможных рисков для здоровья, связанных с употреблением растительных продуктов, обогащённых н-Se [94].

Высокая агрохимическая эффективность и относительная безопасность характерна для селеновых удобрений, содержащих Se в форме органических соединений, например, селеноцистеина, метилселенизированной глюкозы или метилселенизированного лактида. Согласно результатам исследований, агрохимический эффект от применения дешёвой метилселенизированной глюкозы на пшенице в 2–4 раза выше, чем эффект от применения Na_2SeO_3 [95, 96]. Органические формы Se содержатся и в обогащённых этим элементом биоматериалах (навоз, птичий помёт, солома, ряска, выращенная в воде, загрязнённой Se, и т. п.). Соответствующие материалы в настоящее время оцениваются как перспективное и относительно безопасное сырьё для производства удобрений [97, 98].

Ещё одной интересной и перспективной формой Se-удобрений могут стать био-нано-удобрения, НЧ Se с биоудобрениями. Для их биосинтеза применяют бактерии, водоросли, дрожжи, грибы, актиномицеты, растения (в

частности, растительные экстракты). Включение НЧ в биоматрицу может быть реализовано за счёт инкапсулирования, химического связывания и/или сорбции НЧ на поверхности клеток микроорганизмов. Согласно имеющимся оценкам, биологические методы производства н-Se-удобрений открывают новые возможности для экономии ресурсов, повышения эффективности использования питательных веществ, снижения затрат на охрану ОС. Вместе с тем следует иметь в виду, что хотя био-нано-удобрения и позиционируются как экологически безопасную альтернативу традиционным минеральным удобрениям, возможные экологические риски воздействия НЧ на экосистемы всё ещё находятся в стадии изучения и оценки [99–101].

Нормы внесения и эффективность Se-удобрений

Значительный опыт долговременного применения Se-содержащих удобрений для восполнения дефицита этого МЭ в питании населения был получен в Финляндии. Обогащение коммерческих удобрений Se было начато в стране с 1 июля 1984 г., согласно решению Государственного совета. С 1985 г. практически все используемые в Финляндии удобрения содержат Se. Применяемая технология обогащения включает растворение Na_2SeO_4 в суспензии минерального удобрения с последующим гранулированием. Проведённые в Финляндии исследования показали, что ежегодное внесение Na_2SeO_4 в норме примерно 10 г/га под зерновые культуры и 2 г/га под кормовые травы было достаточным для повышения концентрации Se с исходного уровня 10–20 мкг/кг до целевого уровня 100 мкг на кг сухого вещества. Регламентируемый уровень Se в удобрениях несколько раз пересматривался и корректировался в зависимости от результатов мониторинга концентрации этого элемента в сыворотке крови человека, продуктах питания, кормах, а также уровня суточного потребления. В 2007 г. содержание Se в удобрениях составляло 15 мкг/кг, а годовая норма внесения – около 5 г/га. Благодаря использованию обогащённых Se удобрений, среднесуточное потребление этого элемента населением было увеличено до оптимального уровня 60–80 мкг [102–104].

Целесообразность внесения Se в почву в более высокой норме, чем принято в Финляндии, была выявлена в горшечных опытах (полурегулируемые условия) на гречихе обычно-

венной *Fagopyrum esculentum*. Исследования проводили в 2022–2023 гг. в центральноевропейском агрономическом регионе. Согласно опубликованным данным, внесение Na_2SeO_4 в дозе 150 г/га и Na_2SeO_3 в дозах 150 г/га и 300 г/га оказало положительное влияние на урожайность семян данной культуры. Повышение нормы внесения Na_2SeO_4 до 600 г/га вызвало снижение урожайности семян на 23,87 % [105].

Позитивные результаты применения Se-содержащих удобрений были получены и в РФ. В 2015–2017 гг. в Кировской области (Северо-Восточное Нечерноземье), для почв которой характерен выраженный дефицит Se, были проведены полевые испытания различных доз и способов внесения Na_2SeO_4 в комплексе с NPK-удобрениями. Удобрения вносили под яровую пшеницу. Средняя прибавка урожая от внесения NPK составила 8,3 ц/га (48,5 %), от Na_2SeO_4 – 0,6–2,9 ц/га (2,4–11,4 %). Из всех изученных способов применения Na_2SeO_4 (предпосевная обработка семян, основное внесение в почву, некорневые подкормки) наибольший эффект был получен от внесения Se в почву в дозе 180 г действующего вещества на га [106].

Биодоступность внесённых форм неорганического Se в почвах достаточно быстро снижается, поэтому соответствующие удобрения желательно применять в весенний период в фазу активного роста растений. Подкормка пшеницы Na_2SeO_4 в этот период в норме 20 г Se/га позволяет увеличить содержание МЭ в зерне с 0,03 мг/кг (контроль) до 0,4–0,5 мг/кг [107]. Внесение полностью растворимых форм Se под пшеницу предпочтительнее, чем внесение пролонгированных удобрений, поскольку малорастворимые компоненты не оказывают заметного влияния на накопление данного элемента в урожае. Повышение нормы внесения с 5 до 20 г Se/га приводит к линейному увеличению концентрации этого элемента в зерне. На орошаемых полях эффективность Se-удобрений ниже, чем на неорошаемых [108]. Оценка фитотоксичности Se для пшеницы показала, что внесение этого элемента в норме 4–200 г Se/га в виде селената не оказывает угнетающего воздействия на растения [109].

Изучение влияния высоких норм Na_2SeO_4 (200 г Se/га) на фракционирование этого элемента в почве и накопление в растениях (на примере кукурузы) показало, что растения кукурузы усваивают не более 1 % внесённого Se. Данный элемент не накапливается в поч-

ве, что, скорее всего, обусловлено его потерей в результате образования летучих форм. Выщелачивание Se в грунтовые воды предотвращается благодаря адсорбционным процессам, связыванию с органическим веществом почвы и улетучиванию. Таким образом, внесение разумных доз Se в почву может повысить питательную ценность растений без явных негативных последствий для ОС [110].

Заключение

Анализ опубликованных источников показал устойчивый рост научного интереса к проблеме оптимизации селенового статуса населения за счёт использования Se-содержащих удобрений. Изучение влияния Se на продуктивность, стрессоустойчивость и биологическую ценность пищевых и кормовых растений становится центральным направлением современных исследований в соответствующей области. Для обогащения почв могут быть использованы неорганические вещества (селениты, селенаты, n-Se), органические соединения (селеноцистеин, метилселенизированная глюкоза, метилселенизированный лактид) и биоформы этого элемента. В настоящее время чаще всего в качестве микроудобрения используется хорошо растворимый и агрохимически эффективный Na_2SeO_4 . Основным недостатком данного удобрения является высокая токсичность. Применение Na_2SeO_4 для подкормки растений требует строгого соблюдения техники безопасности и тщательного контроля норм внесения, при этом вопросы агрохимического нормирования Se-удобрений на разных почвах и под разные культуры до настоящего времени остаются открытыми. Отсутствие научно обоснованных норм внесения Se приводит к получению нестабильных результатов.

Успешная селенизация бедных почв невозможна без вывода на рынок специализированных гранулированных удобрений, содержащих Se в доступной для растений форме. Информация о технологии производства соответствующих удобрений в научных публикациях практически отсутствует. Ассортимент выпускаемых отечественными предприятиями Se-содержащих удобрений, пригодных для использования в крупных растениеводческих хозяйствах, крайне ограничен.

Применение высокотоксичных соединений Se в качестве удобрений сопряжено с определёнными экологическими рисками, однако восполнение дефицита этого важного

МЭ в почве может оказать положительное влияние на общую продуктивность искусственных и естественных биоценозов. Недостаточная изученность вопроса пока не позволяет сделать однозначных выводов о возможных экологических последствиях селенизации почв в масштабах такой большой и разнообразной по почвенно-климатическим условиям страны, как Россия.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УРО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», ЕГИСУ № 125021402208-5.

References

1. Yang L., Jiang Y., Wu H., Sun J., Huang X., Hong J., Zheng B., Zhu J. Metabolic functions and mechanisms of selenium, selenocysteine, and GPX4 mediated immune regulation through autophagy in solid tumors // *Food Sci. Nutr.* 2025. V. 13. No. 12. Article No. e71230. doi: 10.1002/fsn3.71230
2. Duntas L.H., Benvenga S. Selenium: an element for life // *Endocrine.* 2015. V. 48. No. 3. P. 756–775. doi: 10.1007/s12020-014-0477-6
3. Aktaş İ., Bilgiç S. Human health and selenium // *Ejons International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences.* 2025. V. 9. No. 2. P. 153–169. doi: 10.5281/zenodo.15761884
4. Rayman M.P. Selenium intake, status, and health: a complex relationship // *Hormones.* 2020. V. 19. No. 1. P. 9–14. doi: 10.1007/s42000-001125-5
5. MR 2.3.1.0253-21. Norms of physiological needs for energy and nutrients for various groups of the population of the Russian Federation: methodological recommendations [Internet resource] <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402716140/> (Accessed: 15.01.2026).
6. EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens (NDA); Turck D., Bohn T., Castenmiller J., de Henauw S., Hirsch-Ernst K.I., Knutsen H.K., Maciuk A., Mangelsdorf I., McArdle H.J., Peláez C., Pentieva K., Siani A., Thies F., Tsabouri S., Vinceti M., Aggett P., Crous Bou M., Cubadda F., Ciccolallo L., de Sesmaisons Lecarré A., Fabiani L., Titz A., Naska A. Scientific opinion on the tolerable upper intake level for selenium // *EFSA J.* 2023. V. 21. No. 1. Article No. e07704. doi: 10.2903/j.efsa.2023.7704
7. Belov M.A., Sindireva A.V. Assessment of selenium content in the soil–plant system in the forest-steppe and steppe zone of the Chelyabinsk region // *Environment and Human: Ecological Studies.* 2024. V. 14. No. 4. P. 496–511 (in Russian). doi: 10.31862/2500-2961-2024-14-4-496-511
8. Sun W., Huang B., Zhao Y., Shi X., Darilek J.L., Deng X., Wang H., Zou Z. Spatial variability of soil selenium as affected by geologic and pedogenic processes and its effect on ecosystem and human health // *Geochem. J.* 2009. V. 43. No. 4. P. 217–225. doi: 10.2343/geochemj.1.0019
9. Golubkina N.A., Papazyan T.T. Selenium in nutrition: plants, animals, humans. Moskva, 2006. 254 p. (in Russian).
10. Avtsyn A.P., Zhavoronkov A.A., Rish M.A., Strochkova L.S. Human microelementoses. Moskva: Meditsina, 1991. 496 p. (in Russian).
11. Shirshova T.I., Beshley I.V., Golubkina N.A. The content of selenium in soils of some regions of the Komi Republic // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2018. No. 2 (34). P. 43–48 (in Russian).
12. Kamboj M., Bajpai S., Pandey G., Banic B.K. Effect of selenium and its compounds on human health // *Trace Metals Selenium, Chromium and Vanadium: Chemistry, Biology and Human Health / Eds. Banic B.K., Bajpai S., Kamboj M., Pandey G.* CRC Press, 2025. P. 169–197.
13. Goroshnikova G.A., Drozdova L.I., Belousov A.I. Features metabolic profile of cows in selene deficit zone // *Agrarian Bulletin of the Urals.* 2015. No. 3 (133). P. 15–17 (in Russian).
14. Souza L.S.L., Campos R.O., Braga J.S. Filho, Jesus J.D.S., Anunciação S.M., Cassemiro J.F., Rende P.R.F., Hecht F., Ramos H.E. Selenium nutritional status and thyroid dysfunction // *Arch. Endocrinol. Metabol.* 2025. V. 69. No. 1. Article No. e230348. doi: 10.20945/2359-4292-2023-0348
15. Barchielli G., Capperucci A., Tanini D. The role of selenium in pathologies: an updated review // *Antioxidants.* 2022. V. 11. No. 2. Article No. 251. doi: 10.3390/antiox11020251
16. Medeiros D.M. Copper, iron, and selenium dietary deficiencies negatively impact skeletal integrity: A review // *Exp. Biol. Med.* 2016. V. 241. No. 12. P. 1316–1322. doi: 10.1177/1535370216648805
17. Cardoso B.R., Cominetti C., Seale L.A. Selenium, human health and chronic disease // *Front. Nutr.* 2022. V. 8. Article No. 827759. doi: 10.3389/fnut.2021.827759
18. Raisbeck M.F. Selenosis // *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 2000. V. 16. No. 3. P. 465–480. doi: 10.1016/s0749-0720(15)30081-5
19. Tinggi U. Selenium toxicity and its adverse health effects // *Reviews in Food and Nutrition Toxicity.* V. 4. / Eds. V.R. Preedy, R.R. Watson. CRC Press, 2005. P. 29–56.
20. Lv Q., Liang X., Nong K., Gong Z., Qin T., Qin X., Wang D., Zhu Y. Advances in research on the toxicological effects of selenium // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2021. V. 106. No. 5. P. 715–726. doi: 10.1007/s00128-020-03094-3
21. Temmerman L.D., Waegeneers N., Thiry C., Laing G.D., Tack F., Ruttens A. Selenium content of Belgian cultivated soils and its uptake by field crops and vegetables // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 468–469. P. 77–82. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.016

22. Hou X., Wang Z., Peng M. Selenium compounds and their bioactivities: molecular mechanisms and prospects for functional food and therapeutic applications // *Plants*. 2025. V. 14. No. 17. Article No. 2622. doi: 10.3390/plants14172622
23. Mangiapane E., Pessione A., Pessione E. Selenium and selenoproteins: an overview on different biological systems // *Curr. Protein Pept. Sci.* 2014. V. 15. No. 6. P. 598–607. doi: 10.2174/1389203715666140608151134
24. Coppin F., Chabroulet C., Martin-Garin A., Balesdent J., Gaudet J.P. Methodological approach to assess the effect of soil ageing on selenium behaviour: first results concerning mobility and solid fractionation of selenium // *Biol. Fertil. Soils*. 2006. V. 42. No. 5. P. 379–386. doi: 10.1007/s00374-006-0080-y
25. Vodyanitskii Yu.N. Standards for the contents of heavy metals and metalloids in soils // *Eurasian Soil Sc.* 2012. V. 45. P. 321–328. doi: 10.1134/S1064229312030131
26. Plemenkov V.V. Natural connections of selenium and health of men // *IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences*. 2007. No. 1. P. 51–63 (in Russian).
27. Syrchina N.V., Bogatyryova N.N., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Tailings of enrichment of phosphorites of the Vyatka-Kama deposit as secondary material resources for the production of natural fertilizers // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 107–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-107-114
28. Grigorev N.A. Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust. Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS Publ., 2009. 190 p. (in Russian).
29. Sindireva A.V., Kotchenko S.G., Guryev N.E. Geochemical assessment of selenium content in the main types of soils of the Tyumen region // *Problems of regional ecology*. 2021. No. 3. P. 32–38 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-3-32-38
30. El-Ramady H., Abdalla N., Alshaal T., Domokos-Szabolcsy É., Elhawat N., Prokisch J., Sztrik A., Fári M., El-Marsafawy S., Shams M.S. Selenium in soils under climate change, implication for human health // *Environ. Chem. Lett.* 2015. V. 13. No. 1. P. 1–19. doi: 10.11648/j.ijaas.20170301.11
31. Syrchina N.V., Pilip L.V. The effect of acidification on the sulfide hydrogen emissions in the organic waste of pig farms // *Problems of regional ecology*. 2021. No. 4. P. 102–106 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-4-102-106
32. Saha U., Fayiga A., Sonon L. Selenium in the soil-plant environment: a review // *Int. J. Appl. Agric. Sci.* 2017. V. 3. No. 1. P. 1–18. doi: 10.11648/j.ijaas.20170301.11
33. Fordyce F.M. Selenium deficiency and toxicity in the environment // *Essentials of medical geology / Ed. O. Selenus*. Dordrecht: Springer, 2012. P. 375–416. doi: 10.1007/978-94-007-4375-5_16
34. Pan Z., He S., Li C., Men W., Yan C., Wang F. Geochemical characteristics of soil selenium and evaluation of Se-rich land resources in the central area of Guiyang City, China // *Acta Geochim.* 2017. V. 36. No. 2. P. 240–249. doi: 10.1007/s11631-016-0136-0
35. Sindireva A.V., Golubkina N.A., Erdenetsogt E. An integrated approach to assessing the effect of selenium in the soil-plant system: methodological recommendations. Omsk: KAN Publ. Centre, 2022. 28 p. (in Russian).
36. Belov M.A., Sindireva A.V., Puzanov D.O., Veshkurtseva S.S. Selenium content in environmental objects and in the hair of the population in the territory of the Oktyabrsky district of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra // *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*. 2025. No. 3. P. 157–162 (in Russian). doi: 10.17308/geo/1609-0683/2025/3/157-162
37. Tan J., Zhu W., Wang W., Li R., Hou S., Wang D., Yang L. Selenium in soil and endemic diseases in China // *Sci. Total Environ.* 2002. V. 284. No. 1–3. P. 227–235. doi: 10.1016/S0048-9697(01)00889-0
38. Cheng L., Nazir N., Li X., Zhang J., Zhu Y. Spatial distribution of surface soil selenium and its influencing factors in China: A literature-based analysis // *Environ. Pollut.* 2025. Article No. 126962. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126962
39. Dinh Q.T., Wang M., Tran T.A.T., Zhou F., Wang D., Zhai H. Peng Q., Xue M., Du Z., Bañuelos G.S., Lin Z.Q., Liang D. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach // *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2019. V. 49. No. 6. P. 443–517. doi: 10.1080/10643389.2018.1550987
40. Winkel L.H.E., Vriens B., Jones G.D., Schneider L.S., Pilon-Smits, Bañuelos G.S. Selenium cycling across soil-plant-atmosphere interfaces: a critical review // *Nutrients*. 2015. V. 7. No. 6. P. 4199–4239. doi: 10.3390/nu7064199
41. Roca-Perez L., Gil C., Cervera M.L., González A., Ramos-Miras J., Pons V., Bech J., Boluda R. Selenium and heavy metals content in some Mediterranean soils // *J. Geochem. Explor.* 2010. V. 107. No. 2. P. 110–116. doi: 10.1016/j.gexplo.2010.08.00
42. Liu N., Wang M., Zhou F., Zhai H., Qi M., Liu Y., Li Y., Zhang N., Ma Y., Huang J., Ren R., Liang D. Selenium bioavailability in soil-wheat system and its dominant influential factors: A field study in Shaanxi province, China // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 770. Article No. 144664. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144664
43. Zhao C., Ren J., Xue C., Lin E. Study on the relationship between soil selenium and plant selenium uptake // *Plant and Soil*. 2005. V. 277. No. 1. P. 197–206. doi: 10.1007/s11104-005-7011-9
44. El-Ramady H., Omara A.E.D., El-Sakhawy T., Prokisch J., Brevik E.C. Sources of selenium and nano-selenium in soils and plants // *Selenium and Nano-Selenium in Environmental Stress Management and Crop Quality Improvement / Eds. M.A. Hossain, G.J. Ahammed, Z. Kolbert, H. El-Ramady, T. Islam, M. Schiavon*. Cham: Springer, 2022. P. 1–24. doi: 10.1007/978-3-031-07063-1_1

45. Cupp-Sutton K.A., Ashby M.T. Biological chemistry of hydrogen selenide // *Antioxidants*. 2016. V. 5. No. 4. Article No. 42. doi: 10.3390/antiox5040042
46. Jacob C., Giles G.I., Giles N.M., Sies H. Sulfur and selenium: the role of oxidation state in protein structure and function // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2003. V. 42. No. 39. P. 4742–4758. doi: 10.1002/anie.200300573
47. Sharma V.K., McDonald T.J., Sohn M., Anquandah G.A.K., Pettine M., Zboril R. Biogeochemistry of selenium. A review // *Environ. Chem. Lett.* 2015. V. 13. No. 1. P. 49–58. doi: 10.1007/s10311-014-0487-x
48. Zhang L., Fan J., Liang Q., Zhan T., Liu T., Wang G. Impact of land use changes on selenium distribution and bioavailability in Mollisol of Sanjiang Plain // *Environ. Pollut.* 2025. V. 376. Article No. 126374. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126374
49. Fernández-Martínez A., Charlet L. Selenium environmental cycling and bioavailability: a structural chemist point of view // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2009. V. 8. No. 1. P. 81–110. doi: 10.1007/s11157-009-9145
50. Zhai H., Kleawsampanjai P., Wang M., Qi M., Liu Y., Liu N., Zhou F., Wang M., Liang D. Effects of soil moisture on aging of exogenous selenate in three different soils and mechanisms // *Geoderma*. 2021. V. 390. No. 9. Article No. 114966. doi: 10.1016/j.geoderma.2021.114966
51. Blaylock M.J., James B.R. Redox transformations and plant uptake of selenium resulting from root–soil interactions // *Plant Soil*. 1994. V. 158. No. 1. P. 1–12. doi: 10.1007/BF00007911
52. Jiang Z., Wang Z., Zhao Y., Peng M. Unveiling the vital role of soil microorganisms in selenium cycling: a review // *Front. Microbiol.* 2024. V. 15. Article No. 1448539. doi: 10.3389/fmicb.2024.1448539
53. Wang Z., Huang W., Pang F. Selenium in soil–plant–microbe: a review // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2022. V. 108. No. 2. P. 167–181. doi: 10.1007/s00128-021-03386-2
54. Germ M., Stibilj V., Kreft I. Metabolic importance of selenium for plants // *European Journal of Plant Science and Biotechnology*. 2007. V. 1. No. 10. P. 91–97.
55. Kovalevich Z.S., Golovaty S.E. Accumulation of selenium in cereals grains when using different forms of selenium fertilizers // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*. 2010. No. 3. P. 49–55 (in Russian).
56. Montanari S., Salinitro M., Simoni A., Ciavatta C., Tassoni A. Foraging for selenium: A comparison between hyperaccumulator and non-accumulator plant species // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. No. 1. Article No. 10661. doi: 10.1038/s41598-023-37249-z
57. El Mehdawi A.F., Pilon-Smits E.A.H. Ecological aspects of plant selenium hyperaccumulation // *Plant Biol.* 2012. V. 14. No. 1. P. 1–10. doi: 10.1111/j.1438-8677.2011.00535.x
58. Lindblom S.D., Fakra S.C., Landon J., Schulz P., Tracy B., Pilon-Smits E.A.H. Inoculation of *Astragalus racemosus* and *Astragalus convallarius* with selenium-hyperaccumulator rhizosphere fungi affects growth and selenium accumulation // *Planta*. 2013. V. 237. No. 3. P. 717–729. doi: 10.1007/s00425-012-1789-5
59. Patharajan S., Raaman N. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and selenium uptake by garlic plants // *Arch. Phytopathol. Plant Prot.* 2012. V. 45. No. 2. P. 138–151. doi: 10.1080/03235408.2010.501166
60. Kaur T., Vashisht A., Prakash N.T., Reddy M.S. Role of selenium-tolerant fungi on plant growth promotion and selenium accumulation of maize plants grown in seleniferous soils // *Water Air Soil Pollut.* 2022. V. 233. No. 1. Article No. 17. doi: 10.1007/s11270-021-05490-9
61. Bandeira V.M., Pereira L.T., Cunha Sousa P.F., Alves A.F., de Sousa T.P., da Silva C.M., da Silva W.A., Machado D.C., Viana J.S., Araújo R.A. Increased yield of common bean during interaction between organic selenium and *Trichoderma* spp. // *Revista Aracê*. 2025. V. 7. No. 3. P. 13259–13270. doi: 10.56238/arev7n3-181
62. Golubkina N., Zamana S., Seredin T., Poluboyarino P., Sokolov S., Baranova H., Krivenkov L., Pietrantonio L., Caruso G. Effect of selenium biofortification and beneficial microorganism inoculation on yield, quality and antioxidant properties of shallot bulbs // *Plants*. 2019. V. 8. No. 4. Article No. 102. doi: 10.3390/plants8040102
63. Pilon-Smits E.A.H. Selenium in plants // *Progress in Botany*. V. 76 / Eds. U. Lüttge, W. Beyschlag. Cham: Springer, 2015. P. 93–107. doi: 10.1007/978-3-319-08807-5_4
64. Van Hoewyk D., Garifullina G.F., Ackley A.R., Abdel-Ghany S.E., Marcus M.A., Fakra S., Ishiyama K., Inoue E., Pilon M., Takahashi H., Pilon-Smits E.A.H. Overexpression of AtCpNifS enhances selenium tolerance and accumulation in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2005. V. 139. No. 3. P. 1518–1528. doi: 10.1104/pp.105.068684
65. Ghosh D., Roy S. Role of selenium in agriculture under climate change // *Selenium in sustainable agriculture: a soil to spoon prospective* / Eds. D. Moulick, S. Choudhury. Cham: Springer, 2025. P. 315–336. doi: 10.1007/978-3-031-93957-0_13
66. Sychev V.G., Aristarkhov A.N., Yakovleva T.A., Panasin V.I., Busygin A.S. Problem of selenium and its solution by agrochemical means. The current state of research on the problem of selenium in agroecosystems (report 1) // *Plodorodie*. 2015. No. 4. P. 2–5 (in Russian).
67. Huang Q., Xu Y., Liu Y., Qin X., Huang R., Liang X. Selenium application alters soil cadmium bioavailability and reduces its accumulation in rice grown in Cd-contaminated soil // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. No. 31. P. 31175–31182. doi: 10.1007/s11356-018-3068-x
68. Li Y., Pei G., Zhang Y., Guan S., Lv Y., Li Z., Li H. Development and evaluation of selenium-enriched compound fertilizers for remediation of mercury-contaminated agricultural soil // *Agronomy*. 2025. V. 15. No. 8. Article No. 1842. doi: 10.3390/agronomy15081842

69. Pilip L.V., Syrchina N.V. Effect of meliorants on cadmium mobility in soils // Russian journal of applied ecology. 2023. No. 4. P. 60–66 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.4.60.66
70. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kuznetsov D.A. Livestock complexes as sources of environmental pollution with heavy metals (Cu, Zn) // Principles of the Ecology. 2023. No. 1. P. 82–89 (in Russian). doi: 10.15393/j1.art.2023.13182
71. Guan Q. Selenium-Mediated Rhizosphere Blocking and Control Network: Multidimensional Mechanisms for Regulating Heavy Metal Bioavailability. 2026. doi: 10.20944/preprints202601.0556.v1
72. Kaur S., Nayyar H. Selenium fertilization to salt-stressed mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) plants reduces sodium uptake, improves reproductive function, pod set and seed yield // Sci. Hortic. 2015. V. 197. P. 304–317. doi: 10.1016/j.scienta.2015.09.048
73. Ahmad R., Waraich E., Nawaz F., Ashraf M.Y., Khalid M. Selenium (Se) improves drought tolerance in crop plants – a myth or fact? // J. Sci. Food Agric. 2016. V. 96. No. 2. P. 372–380. doi: 10.1002/jsfa.7231
74. Garousi F. Toxicity of selenium, application of selenium in fertilizers, selenium treatment of seeds, and selenium in edible parts of plants // Acta Univ. Sapientiae: Alimentaria. 2017. V. 10. No. 1. P. 61–74. doi: 10.1515/ausal-2017-0004
75. Estarriaga-Navarro S., Goicoechea N., Plano D., Sanmartín C. Selenium biofortification: integrating one health and sustainability // J. Sci. Food Agric. 2026. V. 106. No. 4. P. 1955–1967. doi: 10.1002/jsfa.70103
76. Gebreyessus G.D., Zewge F. A review on environmental selenium issues // SN Appl. Sci. 2019. V. 1. Article No. 55. doi: 10.1007/s42452-018-0032-9
77. Ros G.H., van Rotterdam A.M.D., Bussink D.W., Bindraban P.S. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: an agro-ecosystem approach // Plant Soil. 2016. V. 404. No. 1. P. 99–112. doi: 10.1007/s11104-016-2830-4
78. Preda C., Vasiliu I., Bredetean O., Gabriela C.D., Ungureanu M.C., Leustean E.L., Grigorovici A., Oprisa C., Vulpoi C. Selenium in the environment: essential or toxic to human health? // Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ). 2016. V. 15. No. 4. P. 913–924. doi: 10.30638/eemj.2016.099
79. Ren X., Wang Y., Sun J., Liang K., Zhu H., Li Y., Gao J., Zhang Y., Huang S., Zhu D. Legal standards for selenium enriched foods and agricultural products: domestic and international perspectives // Nutrients. 2024. V. 16. No. 21. Article No. 3659. doi: 10.33390/nu16213659
80. Wang G., Bohe G., Filley S.J., Pirelli G., Bohle M.G., Davis T.Z., Bañuelos G.L., Hall J.A. Effects of springtime sodium selenate foliar application and NPKS fertilization on selenium concentrations and selenium species in forages across Oregon // Anim. Feed Sci. Technol. 2021. V. 276. Article No. 114944. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2021.114944
81. Ali F., Peng Q., Wang D., Cui Z., Huang J., Fu D., Liang D. Effects of selenite and selenate application on distribution and transformation of selenium fractions in soil and its bioavailability for wheat (*Triticum aestivum* L.) // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. No. 9. P. 8315–8325. doi: 10.1007/s11356-017-8512-9
82. Cartes P., Gianfreda L., Mora M.L. Uptake of selenium and its antioxidant activity in ryegrass when applied as selenate and selenite forms // Plant Soil. 2005. V. 276. No. 1. P. 359–367. doi: 10.1007/s11104-005-5691-9
83. Loganathan P., Hedley M.J. Spatial and time-dependent patterns of selenium (Se) release from selected Se fertiliser granules // Aust. J. Soil Res. 2006. V. 44. No. 2. P. 155–163. doi: 10.1071/SR05139
84. Xu X., Wang J., Wu H., Yuan Q., Wabg J., Cui J., Lin A. Effects of selenium fertilizer application and tomato varieties on tomato fruit quality: a meta-analysis // Sci. Hortic. 2022. V. 304. Article No. 111242. doi: 10.1016/j.scienta.2022.111242
85. Liu J., Qi W.Y., Chen H., Song C., Li Q., Wang S.G. Selenium nanoparticles as an innovative selenium fertilizer exert less disturbance to soil microorganisms // Front. Microbiol. 2021. V. 12. Article No. 746046. doi: 10.3389/fmicb.2021.746046
86. Gudkov S.V., Shafeev G.A., Glinushkin A.P., Shkirin A.V., Barmina E.V., Rakov I.I., Simakin A.V., Kislov A.V., Astashev M.E., Vodeneev V.A., Kalinichenko V.P. Production and use of selenium nanoparticles as fertilizers // ACS Omega. 2020. V. 5. No. 28. P. 17767–17774. doi: 10.1021/acsomega.0c02448
87. Song J., Yu S., Yang R., Xiao J., Liu J.F. Opportunities for the use of selenium nanoparticles in agriculture // NanoImpact. 2023. V. 31. Article No. 100478. doi: 10.1016/j.impact.2023.100478
88. Fang Q., Liu Z., Wang K. Selenium nanoparticles vs selenite fertilizers: implications for toxicological profiles, antioxidant defense, and ferroptosis pathways // J. Agric. Food Chem. 2025. V. 73. No. 19. P. 11634–11646. doi: 10.1021/acs.jafc.5c02034
89. Wang X., Hussain B., Xin X., Zou T., Huang X., Cheng L., Wu Z., Yang Y., Li Y., He Z., Lian J., White J.C., Yang X. Fate and physiological effects of foliar selenium nanoparticles in wheat // ACS Nano. 2025. V. 19. No. 23. P. 21792–21806. doi: 10.1021/acsnano.5c05670
90. Zhang Z., Zhou T., Pan C., Li M., Wang J., Wang X., Wang S., Hu Z., Sun R., Li D. Nanoselenium-driven reduction in chemical fungicide usage: Eco-safety enhancement in pepper *Phytophthora capsici* control // Pestic. Biochem. Physiol. 2025. V. 215. Article No. 106639. doi: 10.1016/j.pestbp.2025.106639
91. Quiterio-Gutiérrez T., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., Hernández-Fuentes A.D., Sandoval-Rangel A., Benavides-Mendoza A., Cabrera-de la Fuente M., Juárez-Maldonado A. The application of selenium and copper nanoparticles modifies the biochemical responses of tomato plants under stress by *Alternaria solani* // Int. J. Mol.

Sci. 2019. V. 20. No. 8. Article No. 1950. doi: 10.3390/ijms20081950

92. Liu H., Zhang Y., Zhang L., Liu Y., Chen Y. Shi Y. Nano-selenium strengthens potato resistance to potato scab induced by *Streptomyces* spp., increases yield, and elevates tuber quality by influencing rhizosphere microbiomes // Front. Plant Sci. 2025. V. 16. No. 3. Article No. 1523174. doi: 10.3389/fpls.2025.1523174

93. Jia Y., Kang L., Wang P., Wu T., Fu X., Wan X., Huang T., Wei X., Wang X., Bi Y., Pan C. Application of nano-selenium and glutathione with pyrimethanil enhance cucumber resistance to *Botrytis cinerea* by boosting root secretion and recruiting beneficial microorganisms // Chem. Eng. J. 2025. V. 528. Article No. 172174. doi: 10.1016/j.cej.2025.172174

94. Garza-García J.J.O., Hernández-Díaz J.A., Zamudio-Ojeda A., León-Morales J.M., Guerrero-Guzmán A., Sánchez-Chiprés D.R., López-Velázquez J.C., García-Morales S. The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology // Biol. Trace Elem. Res. 2022. V. 200. No. 5. P. 2528–2548. doi: 10.1007/s12011-021-02847-3

95. Xian L., Li Q., Li T., Yu L. Methylselenized glucose: an efficient organoselenium fertilizer enhancing the selenium content in wheat grains // Chin. Chem. Lett. 2023. V. 34. No. 5. Article No. 107878. doi: 10.1016/j.ccl.2022.107878

96. Qian R., Shen J., Yu L. Recent advances in agricultural selenium chemistry // J. Agric. Food Chem. 2026. V. 74. No. 4. P. 3283–3289. doi: 10.1021/acs.jafc.5c13028

97. Li J., Otero-Gonzalez L., Parao A., Tack P., Folens K., Ferrer I., Lens P.N.L., Du Laing G. Valorization of selenium-enriched sludge and duckweed generated from wastewater as micronutrient biofertilizer // Chemosphere. 2021. V. 281. Article No. 130767. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130767

98. Wang D., Dinh Q.T., Anh Thu T.T., Zhou F., Yang W., Wang M., Song W., Liang D. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil // Chemosphere. 2018. V. 199. P. 417–426. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.02.007

99. El-Ghamry A., El-Khateeb A.Y., Mosa A.A., El-Ramady H.R. Bio-nano fertilizers preparation using a fully-automated apparatus: a case study of nano-selenium // Env. Biodiv. Soil Security. 2021. V. 5. P. 171–183. doi: 10.21608/jenvbs.2021.88095.1139

100. El-Ghamry A., Mosa A.A., Alshaal T.A., El-Ramady H.R. Nanofertilizers vs. biofertilizers: new insights // Env. Biodiv. Soil Security. 2018. V. 2. No. 1. P. 40–50. doi: 10.21608/jenvbs.2018.3880.1029

101. Sholkamy E.N., Abdelhamid M.A.A., Mekawy A.M.M., El-Sheekh M., Pack S.P. Nano-biofertilizer formulations for sustainable agriculture: potential and limitations // Plant–microbe interactions for environ-

mental and agricultural sustainability / Eds. A. Pandey, K. Choure, M. El-Sheekh, A.N. Yadav. Cham: Springer, 2025. P. 661–693.

102. Keskinen R., Rätty M., Yli-Halla M. Selenium fractions in selenate-fertilized field soils of Finland // Nutr. Cycl. Agroecosyst. 2011. V. 91. No. 1. P. 17–29. doi: 10.1007/s10705-011-9435-3

103. Alftan G., Aspila P., Ekholm P., Euro M., Hartikainen H., Hero H., Hietaniemi V., Root T., Salminen P., Venäläinen E.-R., Aro A. Nationwide supplementation of sodium selenate to commercial fertilizers: history and 25-year results from the Finnish selenium monitoring programme // Combating micronutrient deficiencies: food-based approaches. Wallingford UK: CABI, 2011. P. 312–337. doi: 10.1079/9781845937140.0312

104. Mäkelä A.L., Nantö V., Mäkelä P., Wang W. The effect of nationwide selenium enrichment of fertilizers on selenium status of healthy Finnish medical students living in south western Finland // Biol. Trace Elem. Res. 1993. V. 36. No. 2. P. 151–157. doi: 10.1007/BF02783174

105. Zapletalová A., Kolenčík M., Ducsay L., Vareniová M., Vician T., Černý I., Bušo R. Approach to selenium application in different soil concentrations for encouraged yield, distribution, and biofortification of common buckwheat seeds (*Fagopyrum esculentum* Moench) // Agriculture. 2025. V. 15. No. 8. Article No. 891. doi: 10.3390/agriculture15080891

106. Aristarkhov A.N., Busygin A.S., Yakovleva T.A. Efficiency of different application methods and rates of selenium fertilizers for spring wheat in the soil-climatic conditions of Northeastern Nonchernozemic zone // International agricultural journal. 2018. No. 2. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.24411/2587-6740-2018-12023

107. Curtin D., Hanson R., Lindley T.N., Butler R.C. Selenium concentration in wheat (*Triticum aestivum*) grain as influenced by method, rate, and timing of sodium selenate application // N. Z. J. Crop Hortic. Sci. 2006. V. 34. No. 4. P. 329–339. doi: 10.1080/01140671.2006.9514423

108. Curtin D., Hanson R., Van Der Weerden T.J. Effect of selenium fertiliser formulation and rate of application on selenium concentrations in irrigated and dryland wheat (*Triticum aestivum*) // N. Z. J. Crop Hortic. Sci. 2008. V. 36. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1080/01140670809510216

109. Lyons G.H., Stangoulis J.C.R., Graham R.D. Tolerance of wheat (*Triticum aestivum* L.) to high soil and solution selenium levels // Plant Soil. 2005. V. 270. No. 1. P. 179–188. doi: 10.1007/s11104-004-1390-1

110. De Feudis M., D'Amato R., Businelli D., Guiducci M. Fate of selenium in soil: a case study in a maize (*Zea mays* L.) field under two irrigation regimes and fertilized with sodium selenite // Sci. Total Environ. 2019. V. 659. P. 131–139. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.200

Запасы углерода в надземной части древостоя экспериментальных культур сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) в условиях средней тайги Республики Коми

© 2026. Т. А. Пристова, к. б. н., н. с.,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: pristova@ib.komisc.ru

Проведена сравнительная оценка депонирования углерода в надземной фитомассе сосны скрученной (*Pinus contorta* Dougl.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в экспериментальных культурах в условиях средней тайги Республики Коми. Культуры заложены в Сыктывкарском лесничестве посадкой 2-летних сеянцев весной 2006 г. на сосновой вырубке 2004 г. площадью 1 га. В качестве контроля использованы сеянцы сосны местного происхождения. С помощью метода модельных деревьев проведена оценка надземной фитомассы обеих пород. Определена концентрация углерода компонентов фитомассы изучаемых видов сосны. Установлено, что этот показатель в компонентах фитомассы изменяется от $47,5 \pm 1,7$ до $52,5 \pm 1,8$ % абсолютно сухого вещества. В результате проведённых исследований показано, что для большинства фракций надземной фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной она довольно схожа, за исключением коры сосны скрученной, в которой содержание углерода выше, чем у сосны обыкновенной. Рассчитаны запасы углерода в кг на 1 дерево для разных ступеней толщины и для древостоев сосны скрученной и сосны обыкновенной в тоннах на 1 гектар (тС/га) абсолютно сухого вещества. Показано, что накопление углерода в расчёте на 1 дерево при одинаковой толщине у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной в 1,3–2,1 раза. Установлено, что сосна скрученная при густоте посадки 2,5 тыс. шт./га в 15-летнем возрасте накапливает 6,2 т С/га, сосна обыкновенная в 1,6 раза меньше. Впервые получены данные по концентрации и запасам углерода в культурах сосны скрученной. Результаты проведённых исследований могут использоваться для оценки депонирования углерода искусственными насаждениями.

Ключевые слова: искусственные насаждения, экспериментальные культуры, сосна скрученная (*Pinus contorta*), концентрация углерода, депонирование углерода в фитомассе.

Carbon stocks in the aboveground phytomass of experimental plantation of lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) in the middle taiga of the Komi Republic

© 2026. Т. А. Pristova ORCID: 0000-0002-8266-8113

Institute of Biology of Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: pristova@ib.komisc.ru

A comparative assessment of carbon stocks in the aboveground phytomass of lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in experimental plantation in the middle taiga of the Komi Republic was carried out. The plantation was established in Syktyvkar forestry by planting 2-year-old seedlings in the spring 2006 on a pine cutting of 2004 with an area of 1 hectare. Pine seedlings of local origin were used as a control. The aboveground phytomass of both species was evaluated using the model tree method. It has been established that the carbon content in the phytomass components varies from 47.5 ± 1.7 to 52.5 ± 1.8 % of dry matter. As a result of the studies, it was shown that for most fractions of the aboveground phytomass of lodgepole pine and Scots pine, it is quite similar, with the exception of lodgepole pine bark, in which the carbon content is higher than that of Scots pine. Carbon stocks in kg per 1 tree are calculated for different diameters and for stands of lodgepole pine and Scots pine in tons per hectare (tC/ha) of dry matter. We detected that the accumulation of carbon per 1 tree with the same thickness in lodgepole pine is

1.3–2.1 times higher than in Scots pine. It was found that 15-year-old lodgepole pine with a planting density of 2500 seedlings per hectare accumulates 6.2 tC/ha, Scots pine is 1.6 times less. For the first time, data on the carbon content and its stocks in the lodgepole pine plantation were obtained. The results of the conducted studies can be used to assess carbon deposition in forest plantation.

Keywords: forest plantation, experimental cultures, lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.), carbon content, carbon deposition in phytomass.

Леса России играют значительную роль в круговороте углерода. Лесные экосистемы переводят углерод атмосферы в неактивное состояние и выводят его из круговорота. Для оценки углеродного цикла и углерододепонирующей ёмкости лесных экосистем необходимы данные по содержанию, накоплению и распределению углерода в отдельных структурных элементах биогеоценозов в целом и в фитомассе в частности [1, 2].

Рубки являются одним из главных факторов воздействия на таёжные экосистемы Севера, которые приводят к изменениям основных параметров углеродного цикла. Потери запасов углерода лесами в результате рубок могут быть как обратимыми, так и необратимыми. При воспроизводстве лесов происходит постепенная компенсация запасов углерода в основном за счёт увеличения фитомассы древостоев [1, 2]. Послерубочное восстановление сосновых лесов на территории Республики Коми может происходить как в ходе естественного, так и искусственного восстановления [3].

В настоящее время вводится модель интенсивного использования и воспроизводства лесов, которая предусматривает ускоренное выращивание древесины, в том числе за счёт введения быстрорастущих древесных пород. Одной из таких пород для таёжной зоны Российской Федерации (РФ) является сосна скрученная (*Pinus contorta* Dougl.) – интродуцент, родиной которого является Северная Америка [4].

В европейской части России определена аккумуляция углерода в культурах сосны обыкновенной, которая в зависимости от возраста и густоты посадки составляет от 4 до 66 тС/га [5–8], при этом данных для культур сосны скрученной нами не обнаружено. В зарубежной литературе изучению углеродного цикла насаждений сосны скрученной посвящено несколько работ, проведённых в естественных древостоях Канады [9, 10], однако искусственные насаждения к настоящему времени в этом плане не исследованы. Целью работы является сравнительная оценка запасов углерода надземной части сосны скрученной

и сосны обыкновенной в экспериментальных культурах. В задачи исследований входило определение концентрации и количества углерода, накапливаемого в различных частях дерева, и особенностей его распределения в компонентах фитомассы древостоя для сосны скрученной и сосны обыкновенной.

Объекты и методы исследования

Исследования проводились в 15-летних экспериментальных культурах сосны скрученной в Краснозатонском участковом лесничестве (кв. 34) Сыктывкарского лесничества Республики Коми (61°40' с. ш. 51°03' в. д.). Подробное описание закладки экспериментальных культур на месте вырубki сосняка и их характеристика представлена ранее [11]. Почва – иллювиально-железистый подзол.

Для оценки запасов углерода в древостое исследуемых экспериментальных культур определена его фитомасса с использованием метода модельных деревьев [1, 12, 13]. Отбор моделей пропорционально представительству, по одному среднему из каждой ступени толщины, является наиболее точным [12]. Отобрано и проанализировано 10 модельных деревьев, в том числе 5 деревьев сосны скрученной и 5 – сосны обыкновенной. Взятие 10 моделей на пробной площади сосновых культур обеспечивает достаточно точное выравнивание методом наименьших квадратов [14]. На шести рядовых делянках проведён перебор деревьев по ступеням толщины (182 дерева сосны скрученной и 103 дерева сосны обыкновенной). Рассчитана фитомасса сосны скрученной (*Pinus contorta*) самого северного географического происхождения (штат Юкон, Канада) и контрольного варианта – сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) (Республика Коми, Россия). Растительные образцы для химического анализа отбирали в 5–10-кратной повторности для каждого компонента надземной части дерева обеих пород. Содержание углерода в растительных образцах определено в экоаналитической лаборатории Института биологии Коми НЦ УрО РАН по аттестованной методике измерений № 88-17641-94-2009

(ФР.1.31.2014.17663) «Методика выполнения измерений содержания углерода и азота в твердых объектах методом газовой хроматографии на элементном анализаторе EA 1110 (CHNS-O) (фирма CE Instruments, Италия)». Концентрация углерода приведена в % абсолютно сухого вещества (а. с. в.). Границы интервала абсолютной погрешности определения концентрации углерода (при уровне значимости $P = 0,95$) составили 1,7–1,8 %.

На основании данных по фитомассе древесных растений проведён расчёт запасов углерода путём перемножения массы структурных компонентов каждого вида на концентрацию в них углерода. Для оценки общего запаса углерода в надземной части древостоя исследуемых пород на единицу площади густоту насаждения принимали равной 2 тыс. экз./га. Данные по запасам углерода представлены в килограммах на одно дерево (кгС/дерево) и для всего древостоя – в тоннах на гектар (тС/га) абсолютно сухого вещества (а. с. в.).

Результаты и обсуждение

Концентрация углерода в исследуемых компонентах фитомассы изменяется от $47,5 \pm 1,7$ до $52,5 \pm 1,8$ % а. с. в. (табл. 1). Для большинства фракций фитомассы сосны скрученной и сосны обыкновенной концентрация углерода довольно близка.

Запасы углерода в модельных деревьях сосны обыкновенной с увеличением диаметра возрастают от 1,3 до 6,0, сосны скрученной – от 2,0 до 12,6 кгС/дерево (табл. 2). В ство-

ловой древесине модельных деревьев сосны обыкновенной аккумулируется от 36 до 52, в коре – от 6 до 8, в хвое – от 5 до 26, в живых ветвях – от 16 до 50 % от общего запаса углерода на 1 дерево. Для сосны скрученной распределение углерода на 1 дерево составляет для стволовой древесины – 40–44 %, в коре – 5–7, хвое – 12–29, живых ветвях – 23–43 % от общего запаса углерода на 1 дерево. Таким образом, с увеличением диаметра модельных деревьев обеих пород запасы углерода в них возрастают. Накопление углерода в расчёте на 1 дерево при одинаковой толщине у сосны скрученной выше, чем у сосны обыкновенной в 1,3–2,1 раза. Например, в модельных деревьях диаметром 10 см у сосны скрученной накапливается 12,59, у сосны обыкновенной – 6,02 кгС/дерево (табл. 2).

В исследуемых экспериментальных культурах при густоте посадки 2,5 тыс. шт./га в общей надземной части древостоя сосны скрученной депонируется 6 тС/га, сосны обыкновенной – 4 тС/га (табл. 3).

Сосна скрученная аккумулирует в стволовой древесине 2,5 тС/га, ветви – 1,7, хвоя – 1,6, стволовая кора – 0,4, сухие ветви – 0,04 тС/га, сосна обыкновенная – 1,7; 1,0; 0,8; 0,2 тС/га соответственно.

Анализ данных по содержанию углерода в различных компонентах фитомассы показал, что статистически значимые различия в концентрации углерода между изучаемыми видами наблюдаются только для стволовой коры. В коре сосны скрученной содержание углерода достигает максимального значения среди ана-

Таблица 1 / Table 1
Концентрация углерода в надземной части сосны обыкновенной и сосны скрученной, % а. с. в.
Carbon content in aboveground part of Scots and lodgepole pine, % dry matter

Компонент фитомассы Phytomass component	Сосна скрученная Lodgepole pine	Сосна обыкновенная Scots pine
Хвоя / Needles		
1 года / 1 years old	49,6 ± 1,7	49,6 ± 1,7
2 года / 2 years old	50,4 ± 1,8	50,3 ± 1,8
3 года / 3 years old	49,8 ± 1,7	49,9 ± 1,8
4 года / 4 years old	50,1 ± 1,8	–
Ветви / Branches		
живые / living	50,4 ± 1,8	49,6 ± 1,7
сухие / dry	51,3 ± 1,8	51,1 ± 1,8
Ствол / Stem		
древесина / wood	47,5 ± 1,7	47,8 ± 1,7
кора / bark	52,5 ± 1,8	48,3 ± 1,7

Примечание: ± Δ – границы интервала абсолютной погрешности при $p = 0,95$. Прочерк означает отсутствие данного компонента фитомассы.

Note: ± Δ is the boundary of the absolute error interval at $p = 0.95$. A dash means the absence of this phytomass component.

Таблица 2 / Table 2

Содержание углерода в надземной части модельных деревьев сосны обыкновенной и сосны скрученной, кгС/дерево / Carbon content in the aboveground part of Scots and lodgepole pine model trees, kgC/tree

Диаметр, см Diameter, cm	Высота, м Height, m	Длина кроны, м Crown length, m	Хвоя / Needles				Ветви Branches		Ствол Stem		Всего Total
			1 года 1 years old	2 года 2 years old	3 года 3 years old	4 года 4 years old	живые living	сухие dry	древесина wood	кора bark	
Сосна обыкновенная / Scots pine											
4	4,1	3,1	0,06	0,15	0,11	–	0,21	0,01	0,66	0,09	1,29
5	4,5	3,8	0,08	0,12	0,07	–	0,56	0,14	0,72	0,15	1,84
6	4,8	3,5	0,12	0,14	0,17	–	0,30	0,11	0,70	0,09	1,63
7	5,1	4,1	0,10	0,08	0,09	–	0,74	0,18	1,48	0,19	2,86
10	5,5	4,7	0,08	0,12	0,11	–	3,02	0,16	2,15	0,39	6,02
Сосна скрученная / Lodgepole pine											
4	4,6	4,1	0,12	0,14	0,12	0,13	0,46	0,01	0,86	0,14	1,98
5	4,5	4,4	0,08	0,09	0,10	0,29	0,62	0,01	1,06	0,14	2,39
7	5,4	4,2	0,08	0,46	0,35	0,21	1,43	0,05	1,92	0,32	4,82
8	6,5	5,3	0,49	0,72	0,56	0,66	1,96	–	3,63	0,39	8,41
10	7,2	6,7	0,27	0,37	0,37	0,55	5,41	0,12	4,89	0,61	12,59

Примечание: прочерк означает отсутствие данного компонента фитомассы.
Note: A dash means the absence of this phytomass component.

Таблица 3 / Table 3

Запасы углерода в надземной части древостоя культур сосны, тС/га
Carbon stocks in the aboveground part of the pine plantation stand, tC/ha

Диаметр, см Diameter, cm	Хвоя Needles	Ветви / Branches		Ствол / Stem		Всего Total
		живые living	сухие dry	древесина wood	кора bark	
Сосна обыкновенная / Scots pine						
4	0,28 ± 0,02	0,19 ± 0,02	0,010 ± 0,001	0,59 ± 0,04	0,080 ± 0,001	1,15 ± 0,05
5	0,19 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,100 ± 0,001	0,50 ± 0,04	0,100 ± 0,001	1,28 ± 0,05
6	0,06 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,020 ± 0,001	0,20 ± 0,02	0,020 ± 0,001	0,41 ± 0,02
7	0,09 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,040 ± 0,002	0,30 ± 0,02	0,040 ± 0,001	0,62 ± 0,03
10	0,17 ± 0,01	0,18 ± 0,02	0,010 ± 0,001	0,13 ± 0,01	0,020 ± 0,001	0,51 ± 0,03
Всего / Total	0,79 ± 0,02	1,01 ± 0,02	0,180 ± 0,010	1,72 ± 0,05	0,260 ± 0,010	3,97 ± 0,06
Сосна скрученная / Lodgepole pine						
4	0,37 ± 0,03	0,34 ± 0,03	0,003 ± 0,001	0,63 ± 0,07	0,10 ± 0,01	1,44 ± 0,06
5	0,47 ± 0,04	0,53 ± 0,07	0,004 ± 0,001	0,91 ± 0,08	0,12 ± 0,01	2,03 ± 0,09
7	0,31 ± 0,02	0,29 ± 0,03	0,010 ± 0,004	0,25 ± 0,03	0,07 ± 0,01	0,93 ± 0,10
8	0,30 ± 0,02	0,20 ± 0,02	0,010 ± 0,003	0,40 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,95 ± 0,20
10	0,15 ± 0,02	0,33 ± 0,03	0,007 ± 0,002	0,29 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,82 ± 0,02
Всего / Total	1,60 ± 0,06	1,69 ± 0,05	0,035 ± 0,010	2,48 ± 0,06	0,37 ± 0,40	6,17 ± 0,10

лизируемых образцов. Возможно, что более высокое содержание углерода в стволовой коре сосны скрученной обусловлено видоспецифичностью. Концентрация углерода для остальных компонентов фитомассы у обоих видов довольно схожа. Для обеих пород наиболее низкие концентрации углерода наблюдаются в стволовой древесине – 47,5–47,8, наиболее высокие в сухих ветвях – 51,1–51,3 % а. с. в. Для сосны обыкновенной в естественных среднетаёжных сосняках Республики Коми, по сравнению с исследуемыми культурами, концентрация углерода в хвое и ветвях немного ниже – 46,3 и 47,2 % соответственно, для стволовой древесины и коры значения близки – 47,9 и 48,6 % соответственно [15]. Другими исследователями приводятся схожие значения содержания углерода в ветвях сосны обыкновенной 50,0 % и более высокие в стволах – 50,2 % и хвое – 51,3 % [16]. В литературе данных по концентрации углерода для сосны скрученной нами не обнаружено, поэтому полученные данные представляют определённую новизну и в дальнейшем могут использоваться при оценке запасов углерода в древостоях сосны скрученной в условиях Севера.

По мере увеличения диаметра модельных деревьев с 4 до 10 см масса практически всех частей дерева обеих пород возрастает, за исключением сухих ветвей. Это связано с тем, что усыхание нижних ветвей начинается по достижении определённого запаса насаждения на 1 гектар и происходит постепенно [12]. Согласно полученным данным, закономерных изменений в процентном соотношении запасов углерода для отдельных частей дерева в зависимости от диаметра для исследуемых пород не наблюдается. Соотношение отдельных компонентов фитомассы в накоплении углерода на одно дерево между сосной скрученной и сосной обыкновенной несколько различается. Так, для модельного дерева сосны скрученной диаметром 10 см характерна более высокая доля накопления углерода в хвое по сравнению с сосной обыкновенной. Эти различия обусловлены рядом особенностей ассимиляционного аппарата сосны скрученной по сравнению с сосной обыкновенной: в среднем длина хвоинки на 20 %, масса на 40 % больше, продолжительность жизни хвои на терминальном побеге примерно на 1 год дольше [17]. Также можно отметить, что в сухих сучьях у модельных деревьев сосны скрученной аккумулируется значительно меньше углерода, чем у сосны обыкновенной.

Анализ литературных данных показал, что близкие к полученным нами значения депонирования углерода в фитомассе древостоя сосны обыкновенной приводятся для 20-летних посевов Вологодской области при густоте 4–5 тыс. шт./га – 6 тС/га [6] и 17-летних культур сосны обыкновенной в Казахстане 3–5 тС/га [16]. Более высокие значения этого показателя приводятся для 24-летних культур сосны обыкновенной в Архангельской области при густоте посадки 4 тыс. шт./га – 65,7 тС/га [8], 21-летних культур Красноярского края при густоте 1,2 тыс. шт./га – 20 тС/га [18], и 10-летних культур Ульяновской области с густотой около 7 тыс. шт./га – от 8,8 до 12,0 тС/га [7]. Данных, по депонированию углерода в культурах сосны скрученной в литературе нами не обнаружено, поэтому представленные результаты имеют определённый интерес при изучении углеродного цикла этой древесной породы.

В стволовой древесине сосны скрученной запасы углерода выше, чем у сосны обыкновенной, на 31 % от общих запасов углерода в надземной фитомассе. Это косвенно согласуется с данными ряда исследователей по объёму ствола – сосна скрученная превышает сосну обыкновенную на 17–38 % [11, 19, 20], также отмечается, что сосна скрученная превосходит сосну обыкновенную по высоте до 1,3, по диаметру – до 1,6 раз [17, 21].

Анализ полученных данных показал, что более 70 % запасов углерода в древостое сосны обыкновенной и сосны скрученной сосредоточено в деревьях толщиной 4–6 см. Это связано с особенностями распределения деревьев по ступеням толщины: около 80 % деревьев обеих пород имеют диаметр 4–6 см.

Распределение углерода в надземной фитомассе древостоя для обеих пород очень близко: на долю стволовой древесины в среднем приходится 40–43 %, ветвей 26–27 %, хвои 20–26 %, стволовой коры 6–7 % от общих запасов углерода. Изучаемые виды сосны различаются по накоплению углерода в сухих ветвях: для сосны обыкновенной достигают 8 %, а для сосны скрученной не превышают 1 % от общих запасов углерода в надземной части древостоя. Довольно близкие значения по распределению углерода в надземной фитомассе древостоя 20-летних посевов сосны обыкновенной приводятся для Вологодской области: в стволовой древесине – 40, хвое – 26, сухих ветвях – 4 % от общего количества углерода, депонированного в надземной части древостоя, при этом для живых ветвей при-

водятся более низкие показатели [12]. Для 24-летних культур сосны обыкновенной в Архангельской области приводятся близкие показатели по доле накопления углерода в ветвях (9,8 %), сухих сучьях (4,3 %) и коре (8,2 %), но для древесины эти значения выше (71,5 %), а для хвои – ниже (6,2 %) [8], чем в наших исследованиях. Это обусловлено тем, что с возрастом количество углерода, депонированного в стволовой древесине культур сосны обыкновенной, увеличивается [6, 8]. Также это связано со спецификой аккумуляции органического вещества в частях дерева в зависимости от возраста. Так, для 13-летних культур сосны обыкновенной Архангельской области в лишайниковом типе условий произрастания на стволовую древесину приходится 37–38, для 22-летних – 48–56 % от общих запасов органического вещества в фитомассе насаждения [6]. При этом в 30-летних посевах сосны скрученной в Швеции запасы стволовой древесины достигают 70 % от общих запасов органического вещества в надземной фитомассе древостоя [22].

Следует отметить, что доля участия хвои в депонировании углерода надземной частью фитомассы сосны скрученной на 6 % выше, чем у сосны обыкновенной, а древесины, наоборот, на 3 % ниже, коры и ветвей (живых) – приблизительно одинакова для обоих видов. Таким образом, сосна скрученная в 15-летних экспериментальных культурах, несмотря на схожую с сосной обыкновенной концентрацию углерода, накапливает в надземной фитомассе на 36 % больше углерода, что указывает на более высокие углерододепонирующие свойства этой породы при искусственном выращивании в средней тайге Республики Коми.

Выводы

Установлено, что запасы углерода надземной части древостоя в экспериментальных культурах Сыктывкарского лесничества Республики Коми при густоте посадки 2,5 тыс. шт/га составляют для сосны скрученной 6,2 тС/га а. с. в., что в 1,6 раза больше, чем для сосны обыкновенной.

Концентрация углерода в различных частях дерева для сосны скрученной и сосны обыкновенной изменяется от $47,5 \pm 1,7$ до $52,5 \pm 1,8$ % а. с. в. Определено, что для большинства фракций фитомассы исследуемых видов содержание углерода приблизительно одинаково, за исключением стволовой коры сосны скрученной.

Сравнение запасов углерода в компонентах фитомассы показало, что в стволовой древесине сосны скрученной накапливается на 31 %, в коре – на 30, в хвое – на 51 и ветвях – на 40 % больше углерода, чем в сосне обыкновенной.

Оценка распределения углерода в надземной части древостоя показала сходство между исследуемыми породами: на долю стволовой древесины в среднем приходится 40–43 %, ветвей – 26–27 %, хвои – 20–26 %, коры – 6–7 % от общих запасов углерода в надземной части фитомассы.

Полученные данные могут использоваться при изучении углеродного цикла и оценке депонирования углерода искусственными насаждениями сосны обыкновенной и сосны скрученной в условиях средней тайги.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем европейского северо-востока России» № 125020501547-8.

Выражаю благодарность А. Л. Федоркову и А. И. Патову за всестороннюю помощь в работе, а также ведущему инженеру-химику ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН Е. А. Тумановой за выполнение химических анализов

Литература

1. Усольцев В.А., Залесов С.В. Методы определения биологической продуктивности насаждений. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. 147 с.
2. Пулы и потоки углерода в надземных экосистемах России / Под ред. Г.А. Заварзина. М.: Наука, 2007. 315 с.
3. Лиханова И.А., Пыстина Т.Н., Шушпанникова Г.С., Железнова Г.В. Восстановление сосняков лишайниковых на карьерах среднетаёжной подзоны Северо-востока европейской части России // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 196–201. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-196-201
4. Мелехов И.С. Интродукция хвойных в лесном хозяйстве // Лесоведение. 1984. № 6. С. 72–78.
5. Казанкин А.А. Фитомасса и органический углерод культур сосны Республики Марий Эл: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола: Марийс. гос. техн. ун-т, 2002. 24 с.
6. Бабич Н.А., Клевцов Д.Н., Евдокимов И.В. Зональные закономерности изменения фитомассы культур сосны. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. 140 с.
7. Чураков Б.П., Манякина Е.В. Депонирование углерода разновозрастными культурами сосны // Ульяновский медико-биологический журнал. 2012. № 1. С. 125–129.

8. Сунгурова Н.Р., Худяков В.В., Страздаускас С.Е. Сравнительная структура углеродного пула в надземной фитомассе культур сосны и ели // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 3. С. 159–165. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.3.159
9. Brown M.G., Black T.A., Nestic Z., Fredeen A.L., Foord V.N., Spittlehouse D.L., Bowler R., Burton P.J., Trofymow J.A., Grant N.J., Lessard D. The carbon balance of two longepole pine beetle stands recovering from mountain pine beetle attack in British Columbia // Agric. For. Meteorol. 2012. V. 153. P. 82–93. doi: 10.1016/j.agroformet.2011.07.010
10. Sullivan T.P., Sullivan D.S., Lindgren P.M.F., Ransome D.B., Zabek L. Twenty-five years after stand thinning and repeated fertilization in lodgepole pine forest: imprecations for tree growth, stand structure and carbon sequestration // Forests. 2020. V. 11. No. 3. Article No. 337. doi: 10.3390/f11030337
11. Fedorkov A., Gutiy L. Performance of lodgepole pine and Scots pine in field trials located in north-west Russia // Silva Fennica. 2017. V. 51. No. 1. Article No. 1692. doi: 10.14214/af.1692
12. Бабич Н.А., Мерзленко М.Д. Биологическая продуктивность лесных культур. Архангельск: Изд-во АГТУ, 1998. 89 с.
13. Repola J. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // Silva Fennica. 2009. V. 43. No. 4. P. 625–647. doi: 10.14214/sf.184
14. Уткин А.И., Ифанова М.Г., Ермолова Л.С. Первичная биологическая продуктивность культур сосны обыкновенной во Владимирской области // Лесоведение. 1981. № 4. С. 19–27.
15. Бобкова К.С., Тужилкина В.В. Содержание углерода и калорийность органического вещества в лесных экосистемах Севера // Экология. 2001. № 1. С. 69–74.
16. Tumenbayeva A.R., Sarsekova D.N., Małek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry. 2018. V. 60. No. 3. P. 137–142. doi: 10.2478/ffp-2018-0013
17. Феклистов П.А., Бирюков С.Ю., Федяев А.Л. Сравнительные эколого-биологические особенности сосны скрученной и обыкновенной в северной подзоне европейской тайги. Архангельск: Архангельский гос. техн. ун-т, 2008. 118 с.
18. Горбунова Ю.В. Баланс углерода в культурах сосны техногенных ландшафтов // Вестник КрасГАУ. 2008. № 2. С. 142–148.
19. Раевский Б.В., Пеккоев А.Н. Перспективы выращивания сосны скрученной в Южной Карелии // Инновации и технологии в лесном хозяйстве – 2013: материалы III междунар. науч.-практ. конф. Ч. 2. СПб.: СПбНИИЛХ, 2013. С. 182–193.
20. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // For. Ecol. Manage. 2001. V. 141. No. 1–2. P. 15–29. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00485-0
21. Демидова Н.А., Дуркина Т.М., Гоголева Л.Г., Демиденко С.А., Быков Ю.С., Парамонов А.А. Рост и развитие сосны скрученной (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) в условиях северной тайги // Труды Санкт-петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 45–59. doi: 10.24178/2079-6080.2016.2.42
22. Backlund I., Bergsten U. Biomass production of dense direct-seeded longepole pine (*Pinus contorta*) at short rotation periods // Silva Fennica. 2012. V. 46. No. 4. P. 609–623. doi: 10.14214/sf.1321

References

1. Usol'cev V.A., Zalesov S.V. Methods for determining the biological productivity of plantations. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2005. 147 p. (in Russian).
2. Carbon pools and fluxes in the aboveground ecosystems of Russia. Moskva: Nauka, 2007. 315 p. (in Russian).
3. Likhanova I.A., Pystina T.N., Shushpannikova G.S., Zheleznova G.V. Reforestation of lichen pine forests at the open pits in the middle taiga of the North-East of European part of Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 196–201 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-196-201
4. Melekhov I.S. Introduction of conifers in forestry // Lesovedenie. 1984. No. 6. P. 72–78 (in Russian).
5. Kazankin A.A. Phytomass and organic carbon of pine plantations of the Mari El Republic: abstr. diss. ... Candidate of Agricultural Sciences. Yoshkar-Ola: Mariyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2002. 24 p. (in Russian).
6. Babich N.A., Klevcov D.N., Evdokimov I.V. Zonal patterns of phytomass changes in the pine plantations. Arhangel'sk: Severnyj (Arkticheskij) federal'nyj universitet, 2010. 140 p. (in Russian).
7. Churakov B.P., Manyakina E.V. Carbon deposition by uneven-age cultures of pine // Ulyanovsk medicobiological journal. 2012. No. 1. P. 125–129 (in Russian).
8. Sungurova N.R., Hudyakov V.V., Strazdauskas S.E. Comparative structure of the carbon pool in the aboveground phytomass of pine and spruce plantations // Russian forestry journal. 2019. No. 3. P. 159–165 (in Russian). doi: 10.17238/issn0536-1036-2019.3.159
9. Brown M.G., Black T.A., Nestic Z., Fredeen A.L., Foord V.N., Spittlehouse D.L., Bowler R., Burton P.J., Trofymow J.A., Grant N.J., Lessard D. The carbon balance of two longepole pine beetle stands recovering from mountain pine beetle attack in British Columbia // Agric. For. Meteorol. 2012. V. 153. P. 82–93. doi: 10.1016/j.agroformet.2011.07.010
10. Sullivan T.P., Sullivan D.S., Lindgren P.M.F., Ransome D.B., Zabek L. Twenty-five years after stand

thinning and repeated fertilization in lodgepole pine forest: imprecations for tree growth, stand structure and carbon sequestration // *Forests*. 2020. V. 11. No. 3. Article No. 337. doi: 10.3390/f11030337

11. Fedorkov A., Gutiy L. Performance of lodgepole pine and Scots pine in field trials located in north-west Russia // *Silva Fennica*. 2017. V. 51. No. 1. Article No. 1692. doi: 10.14214/af.1692

12. Babich N.A., Merzlenko M.D. Biological productivity of forest plantations. Arkhangelsk: Izdatelstvo Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 1998. 89 p. (in Russian).

13. Repola J. Biomass equations for Scots pine and Norway spruce in Finland // *Silva Fennica*. 2009. V. 43. No. 4. P. 625–647. doi: 10.14214/sf.184

14. Utkin A.I., Ifanova M.G., Ermolova L.S. Primary biological productivity of Scots pine crops in the Vladimir region // *Lesovedenie*. 1981. No. 4. P. 19–27 (in Russian).

15. Bobkova K.S., Tuzhilkina V.V. Carbon content and calorific value of organic matter in the North forest ecosystems // *Ekologiya*. 2001. No. 1. P. 69–74 (in Russian).

16. Tumenbayeva A.R., Sarsekova D.N., Malek S. Carbon sequestration of above-ground biomass of *Pinus sylvestris* L. in the green belt of the city of Astana // *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2018. V. 60. No. 3. P. 137–142. doi: 10.2478/ffp-2018-0013

17. Feklistov P.A., Biryukov S.Yu., Fedyayev A.L. Comparative ecological and biological features of lodgepole and Scotch pine in the northern subzone of the European taiga. Arkhangelsk: Arkhangel'skiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet, 2008. 118 p. (in Russian).

18. Gorbunova Yu.V. Carbon balance in pine cultures of technogenic landscapes // *Bulletin of KrasGAU*. 2008. No. 2. P. 142–148 (in Russian).

19. Raevskij B.V., Pekkoev A.N. Some perspectives of lodgepole pine planting in South Karelia // *Innovations and technologies in forestry – 2013: conference proceedings. Pt. 2*. Sankt-Peterburg: SPbNIIKKh, 2013. P. 182–193 (in Russian).

20. Elfving B., Ericsson T., Rosvall O. The introduction of lodgepole pine for wood production in Sweden – a review // *For. Ecol. Manage.* 2001. V. 141. No. 1–2. P. 15–29. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00485-0

21. Demidova N.A., Durkina T.M., Gogoleva L.G., Demidenko S.A., Bykov Yu.S., Paramonov A.A. Growth and development of lodgepole pine (*Pinus contorta* Loud. var. *latifolia* S. Wats) in the northern boreal forest // *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2016. No. 2. P. 45–59 (in Russian). doi: 10.21178/2079-6080.2016.2.42

22. Backlund I., Bergsten U. Biomass production of dense direct-seeded longepole pine (*Pinus contorta*) at short rotation periods // *Silva Fennica*. 2012. V. 46. No. 4. P. 609–623. doi: 10.14214/sf.1321

Effects of *Eisenia fetida* population size on *Lactuca sativa* growth and productivity in model ecosystems

© 2026. Т. И. Зюбанова¹ ORCID: 0000-0002-9429-9706, О. М. Минаева^{1,2} ORCID: 0000-0002-5925-6022,

Е. Е. Акимова¹ ORCID: 0000-0002-3279-8200, Н. Н. Терещенко³ ORCID: 0000-0002-3084-6926

¹Siberian Research Institute of Agriculture and Peat, Branch of the Federal State Budgetary Institution of Science, Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies,

Russian Academy of Sciences,

3, Gagarina St., Tomsk, Russia, 634050,

²Tomsk State University,

36, Lenina Pr., Tomsk, Russia, 634050,

³Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,

40, Lenina Pr., Tomsk, Russia, 634050,

e-mail: zyubanovat.i@gmail.com, mom05@mail.ru, akimovanell@mail.ru, ternat@mail.ru

Artificial ecosystems are a convenient tool for studying the environmental effect on the functioning and interrelation between different elements in a model biosphere. An increase in the productivity of artificial ecosystems can be associated with the introduction of natural decomposers (earthworms), which alter the qualitative and quantitative composition of the soil microbiota, accelerate the processes of organic matter mineralization, increase the suppressive activity of substrates, and positively affect plant growth and development. In laboratory experiments, we evaluated the effect of a biotic factor (*Eisenia fetida* population) on model system productivity (*Lactuca sativa* plants). Earthworms were introduced at 6, 12, 25, 37, and 62 individuals per kg substrate (peat and 10 % of cattle manure). At the experiment's finish, each plant's height, leaf area, biomass (fresh and dry), photosynthetic pigment content, and photosystem II photochemical activity parameters were measured; earthworms and cocoons were counted; and the earthworms were weighed as well as worm cast. It was found that earthworms reproduced successfully in all microcosms, increasing their population. The earthworm population's size in the microcosm affected the lettuce plants' vegetative growth and physiological and biochemical parameters. The earthworms also significantly affected lettuce productivity and photochemical quenching coefficients. The effect of earthworm population size had a classical ecological form and could be described by an optimum curve (Shelford's law of tolerance). Maximum plant productivity and vegetative growth were achieved with 25 and 37 earthworms per kg substrate. These data can be extrapolated to the biosphere's natural elements and can be used to develop artificial ecosystems and increase greenhouse system productivity.

Keywords: earthworm, lettuce, microcosm, photochemical activity of photosystem, photosynthesis, productivity, Shelford's law of tolerance.

УДК 57.02

Влияние численности популяции *Eisenia fetida* на рост и продуктивность *Lactuca sativa* в модельных экосистемах

© 2026. Т. И. Зюбанова¹, к. б. н., с. н. с.,

О. М. Минаева^{1,2}, к. б. н., с. н. с., Е. Е. Акимова¹, к. б. н., с. н. с.,

Н. Н. Терещенко³, д. б. н., профессор,

¹СибНИИСХиТ-филиал СФНЦА РАН,

634050, Россия, г. Томск, ул. Гагарина, д. 3,

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 36,

³Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 40,

e-mail: zyubanovat.i@gmail.com, mom05@mail.ru,

akimovanell@mail.ru, ternat@mail.ru

Использование искусственных экосистем является удобным инструментом для изучения влияния факторов окружающей среды на функционирование различных элементов в модельной системе и взаимосвязи между ними. Повышение их продуктивности может быть связано с введением в них естественных редуцентов (дождевых червей), которые изменяют качественный и количественный состав почвенной микробиоты, ускоряют процессы минерализации органических отходов, увеличивают супрессивную активность субстратов, положительно влияют на рост и развитие растений. В ходе лабораторных экспериментов установлено влияние биотического фактора (популяции дождевых червей *Eisenia fetida*) на продуктивность модельной системы (биомасса растений салата). Дождевых червей вносили в количестве 6, 12, 25, 37 и 62 особей/кг субстрата (торф и 10 % навоза крупного рогатого скота). В конце эксперимента измерены высота каждого растения, площадь листьев, биомасса (свежая и сухая), содержание фотосинтетических пигментов и параметры фотохимической активности фотосистемы II; учтено количество и масса дождевых червей, количество коконов, а также выход копролита. Установлено, что дождевые черви успешно размножились во всех микрокосмах, увеличивая свою популяцию. Численность популяции дождевых червей в микрокосме влияла на вегетативный рост и физиологические и биохимические параметры и продуктивность растений салата, а также коэффициенты фотохимического тушения. Влияние численности популяции дождевых червей на продуктивность модельной системы имело классическую экологическую форму и описано кривой оптимума (закон толерантности Шелфорда). Максимальная продуктивность растений и вегетативный рост достигались при 25 и 37 дождевых червях/кг субстрата. Эти данные могут быть экстраполированы на естественные элементы биосферы и использованы для создания искусственных экосистем и повышения продуктивности тепличных систем.

Ключевые слова: дождевой червь, латук, микрокосм, фотохимическая активность фотосистемы, фотосинтез, продуктивность, закон толерантности Шелфорда.

Model ecosystems differing in closure levels, size, complexity, components, and temporal boundaries are of particular interest to researchers because they provide information on ecological processes and biogeochemical cycles; interactions between species and populations; and the impact of abiotic, biotic, and anthropogenic factors [1–3].

Such systems can comprise different numbers of elements: from the simplest, comprising single producers, consumers, and decomposers, to complex closed multi-component ecosystems, such as controlled closed ecological life support systems [1]. Their use overcomes the problem of developing working ecosystem models to study ecological processes, create life support systems for space purposes, ensure a high quality of human life in extreme environmental conditions, solve pollution problems, and develop highly productive sustainable agriculture [3, 4]. Closed artificial ecosystems used to create autonomous high-tech biocomplexes for use in far-north regions and space expeditions deserve special attention [4].

Artificial ecosystems enable the study of interactions between the basic elements of any agro-system and solving of applied problems: increasing the productivity of plants included in these systems, controlling plant pathogens, and organic waste recycling [3, 5]. The solutions to these problems can be associated with introducing earthworms into model systems, natural decomposers that also change the qualitative and quantitative compositions of the soil microbiota and plant rhizosphere zone, increasing the antagonist species of soil phytopathogens and plant growth promoters. Therefore, introducing earth-

worms changes the system. Earthworms act as catalysts for two major ‘supporting services’, soil formation and nutrient cycling, which are prerequisites for other services [6]. Earthworms affect plant growth positively, play a major role in soil function, and are responsible for many ecosystem services [5–8]. The presence of earthworms or vermicompost alters plant morphology and pathogen resistance [6] and increases plant biomass by 23 % and yield by 25 % [8]. However, some reports show neutral or adverse effects of earthworms on plants [6, 7, 9]. Factors such as soil characteristics, plant species and physiology, and earthworms play important roles in this process [5]. Studies on earthworm-plant interactions may contribute significantly to a more comprehensive understanding of terrestrial ecosystems and the development of more environmentally friendly agricultural practices [7].

However, understanding how all these components function is necessary to optimise the functioning of the whole system, from photosynthesis (creating organic substances) to recycling. This knowledge will enhance understanding of the mechanisms and consequences of earthworm introduction, the size of their introduced population, and the time necessary for ecosystem productivity. Moreover, well-designed laboratory experiments with closed ecosystems and field experiments, coupling basic biological and soil science measurements, enable us to better understand how the system’s mechanisms function and fill knowledge gaps.

There is much experimental research on the effect of worms such as *Aporrectodea caliginosa*, *Pontoscolex corethrurus*, *Metaphire guillelmi*, *Octolasion tyrtaeum*, and *Allolobophora chlorotica*.

However, there is insufficient information about the effects of *Eisenia fetida* on plants and their productivity in closed artificial systems.

Therefore, this study aimed to investigate the effect of initial *Eisenia fetida* populations introduced into an artificial model ecosystem on lettuce vegetative growth, productivity, and physiological parameters and the earthworms' characteristics and productivity.

Materials and research methods

The effect of earthworm population size (individuals per kg substrate) was investigated in laboratory experiments. The model ecosystems (microcosms) comprised a peat substrate into which the earthworms were introduced and lettuce plants were planted. Experiments were set up in plastic opaque experimental pots (2 L volume) and used deoxidised high-moor peat (80 % moisture) supplemented with 10 % cattle manure (80–90 % moisture; by weight) with a total substrate mass of 800 g. Substrate moisture was maintained at 80–85 % and temperature at 15–22 °C during the experiment [10].

The peat used in the experiments was obtained from the Ust-Bakcharsky peat deposit (Chainsky district, Tomsk region, Russia). Its substrate agrochemical characteristics were the following: pH (KCl) 6.9 ± 0.1 , 0.65 ± 0.07 N-NH₄ g kg⁻¹, 0.16 ± 0.02 N-NO₃ g kg⁻¹, 1.06 ± 0.17 P₂O g kg⁻¹, and 0.35 ± 0.08 K₂O g kg⁻¹.

Adult *E. fetida* (Sav.) earthworms were collected from a laboratory where they were reared in controlled conditions (16 ± 2 °C, in the dark, and ~80 % moisture by mass) on a mixture of peat, vegetable rests, and cattle manure. The earthworm *E. fetida* is often used in vermicomposting due to its ability to decompose agricultural organic residues, adaptability to different environmental conditions, rapid reproduction, and effects on soil nutrient availability and plant growth [11, 12].

Earthworms were chosen for the experiment and test preparation as described in the paper [5]. Sub-adult individuals of similar size and developmental stage were selected. Earthworm weight (combined weight per treatment) was recorded at the beginning (m_0) and end (m_1) of the 61-day exposure. After seven days of substrate preparation, in all earthworm treatments, earthworms were introduced at 6, 12, 25, 37, or 62 individuals per kg substrate. At the experiment's end worm fecundity and worm cast were determined. Worm fecundity was calculated as the sum of hatching and non-hatching worms (cocoons) per adult. The substrate in all micro-

cosms was sieved (2 mm), and worm cast was calculated as its percentage weight difference in microcosms with and without worms [10].

Control microcosms (without earthworms) were prepared and incubated simultaneously.

After seven days, five pre-germinated lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia* variety 'Adamant') seeds were transferred to each microcosm. Plant growth was performed under controlled conditions: 8 kLq fluorescent lamps ($110 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ photosynthetic photon flux density) for 12 h per day, and 20–22 °C (day) and 15–17 °C (night) temperatures.

The experiments comprised 64 days of growing plants (68 days from substrate preparation). Plant heights were repeatedly measured during the experiment to determine their growth rate. At the experiment's end (54 days after transplanting), each plant height, leaf area, and biomass (fresh and dry) were measured. The photochemical activity parameters of photosystem II, PS II, were measured on a dark-adapted plant leaf with a Junior-PAM fluorimeter (Heinz-Walz, Germany). A special leaf clip holder was placed on each leaf to maintain dark conditions for at least 30 min before taking a reading. The maximum potential quantum efficiency of PS II, Fv/Fm, the PS II effective quantum yield, Y(II), and the quantum yields of light-induced, Y(NPQ), and non-light-induced, Y(NO) non-photochemical fluorescence quenching (NPQ) were calculated with the WinControl-3 software for PAM fluorimeters. After determining the photochemical activity parameters primary photosynthetic pigment content was also measured on the same leaf spectrophotometrically (Eppendorf BioSpectrometer fluorescence, Germany) [13].

The peat substrate in the pots was poured out, earthworms were carefully collected, and the substrate on their surface was removed after determining the plant characteristics. The numbers of earthworms (adults and juveniles) and cocoons were counted, and the earthworms were weighed (m_1 was the weight of worms at the experiment's end).

All experiments were performed in three independent biological replicates of five plants per microcosm. All data were tested for homogeneity of variance and normality with the Kolmogorov-Smirnov test. The experimental data are presented in tables as medians ($M\bar{e}$) and figures as means with standard errors of the mean ($M \pm mM$). Differences between groups were assessed using nonparametric Mann-Whitney U tests, considering $p < 0.05$ as statistically significant.

Results and discussion

The main characteristics of *Eisenia fetida* populations in the microcosms. The effect of *E. fetida* earthworm density in a closed system on lettuce growth and development on a peat-dung substrate without amended mineral nutrition was studied for the first time. Another original feature of this study was investigating the main characteristics and the initial population of earthworms in microcosms.

In our experiments, all introduced earthworms survived. We did not find earthworms in microcosms that did not have *E. fetida* introduced at the beginning of the experiment, indicating no contamination among microcosms. Earthworm abundance increased in all microcosms (Table 1). Earthworms show excellent survival, fecundity, and substrate processing in laboratory experiments. Adult earthworm biomass increased by 36.6 and 27.0 %, respectively, in microcosms with 6 and 12 earthworms, while it decreased by 9.5–28.0 % in the other microcosms.

The number of earthworms (adult and juvenile) at the experiment’s end was higher in microcosms with larger initial population sizes. In microcosms with 62 earthworms, there was only a small increase in their final population size. However, in microcosms with 37 earthworms, their numbers doubled. Similarly, in microcosms with 67 earthworms, their numbers increased 1.2-fold. Impressively, in microcosms with 12 earthworms, their final numbers increased 4.6-fold. The earthworms laid similar numbers of cocoons during the experiments with initial 12–37 earthworms. However, the number of cocoons was two-fold lower in microcosms with 67 earthworms at the end of the experiment.

Previous studies focused on the effects worms had on plant development, heavy metal

absorption, soil nitrogen content, and emission when introduced into the substrate. However, studying worm population and productivity parameters and vermicomposting processes is insufficient. Researchers usually counted the number and weight of worms at the beginning and end of the experiment and noted the presence of cocoons or worm casts. The choice of the number of worms for the laboratory experiment was not always justified and was calculated based on their population density in nature [5, 14, 15].

In our experiments, one main focus was studying the effect of the initial earthworm population on substrate volume. We also studied the size of the earthworm population for optimal coexistence in microcosms comprising earthworms and plants. Moreover, the efficiency of vermicomposting depends on earthworm biomass and population structure [12].

In addition, we included a seven-day rest period between substrate preparation and earthworm introduction and lettuce seedlings planting. This rest period was necessary for the preliminary adaptation of earthworms to the microcosm’s conditions. Therefore, we attempted to create close to natural conditions for the system’s functioning and optimal living conditions for all its components. Other studies planted plants before adding earthworms [15–17] and mineral nutrition to improve plant growth during the experiment [15]. In addition, they used natural soils as a substrate [9, 14–16, 18].

Almost all studies noted a relatively high survival rate of earthworms in experiments. However, many noted lower per-earthworm weights [10, 14–16], especially when using a poor soil [9]. Some studies have shown that adding artificial nitrogen to the substrate or couple cultivation of earthworms and nitrogen-fixing

Table 1

The main characteristics of *Eisenia fetida* population in the microcosms ($M\bar{e}$)

Microcosm	Worm weight of one individual, g		Worm number, psc.	Cocoon number, psc.	Fecundity, psc./worm	Worm cast, %
	m_0	m_1				
0 worms (Control)	0	0	0	0	0	0
6 worms	0.19	0.25	20.0	25	6.2	3.44
12 worms	0.19	0.24	55.2	34	6.1	8.04
25 worms	0.21	0.19	65.6	36	3.1	8.50
37 worms	0.19	0.16	76.5	34	1.9	2.33
62 worms	0.18	0.13	77.5	16	0.5	8.27

Note: m_0 – earthworm weight (combined weight per treatment) at the beginning of the experiment; m_1 – earthworm weight at the end of the 61-day exposure.

Table 2

Effect of *Eisenia fetida* abundance on *Lactuca sativa* vegetative growth parameters ($M\bar{x}$)

Microcosm	Height, cm	Growth rate, cm per day	Leaf area, cm ²	Productivity, kg/m ²
0 worms (Control)	21.60	0.080	264.62	2.82
6 worms	20.90	0.082	306.94*	2.48*
12 worms	21.40	0.091*	331.78*	3.06*
25 worms	21.80	0.095*	351.70*	3.11*
37 worms	22.10	0.070*	385.96*	2.85*
62 worms	19.95	0.081	293.18*	1.58*

Note (here and further in tables 3, 4): * – differences from a microcosm without earthworms are significant at $p < 0.05$.

plants increased earthworm biomass, survival, and reproduction [12]. In our study, decreases in *E. fetida* reproductive activity with increasing initial abundance in these ecosystems were likely due to a lack of food resources (10 % manure in a peat substrate), which acted as a limiting factor. Therefore, according to our results, the experimental conditions (microcosms) favoured *E. fetida* development and reproduction. In addition, this earthworm species is well-suited and adapted to microcosms with lettuce maintained under abiotic conditions.

Effect of *Eisenia fetida* on *Lactuca sativa* vegetative growth parameters. According to our results, introducing *E. fetida* earthworms in peat substrate stimulated *L. sativa* productivity in a pot laboratory experiment (Table 2). The plant growth rate in microcosms with earthworms was significantly higher than in those without earthworms ($p < 0.05$). Plant leaf areas were 11–45 % larger in microcosms with earthworms than without them. The earthworms also significantly affected lettuce productivity.

Earthworm introduction (12–37 earthworms per microcosm) tended to increase plant height. The more earthworms there are in the microcosms, the greater stimulating effect on the lettuce plants, up to a certain limit: 37 individuals per kg substrate (2102 individuals per m²). Further increases in earthworm initial population size had adverse effects, inhibiting lettuce plant growth and productivity. In our opinion, this effect may be due to the competition of earthworms and their microflora with plants for the limited nutrient content in the substrate and damage to their root system associated with earthworm movements in the root zone. Possible damage to plant roots due to earthworm movement in the soil was found in *Arabidopsis thaliana* plants grown in closed-space microcosm. Multiple root injuries were caused by earthworms, which led to wounding stress [9].

Few studies have examined the effects of earthworm population size on plant growth in

artificial model systems in the laboratory. It was reported that worms had a more significant effect on plant growth and development at a population density of >400 individuals per m², corresponding to ≥ 7 individuals per kg [19]. Many reports on the beneficial roles of earthworms in model systems support our results and the positive effects of earthworms and vermicompost on plants and their productivity [9, 8, 15, 16, 18, 20]. Due to earthworm activity, plants received more nutrients, and soil structure improved [7, 10, 20, 21].

Therefore, our data show that the beneficial role of earthworms on plants depends on population size. An increase in the number of earthworms above the established limit (>37 individuals per kg substrate) had adverse effects. This limit must be accounted for when developing terrestrial model systems comprising producers (plants) and decomposers (earthworms), where the population size of the latter should be regulated both when functioning systems are established and during their long-term maintenance.

Effects of *Eisenia fetida* on *Lactuca sativa* photosynthesis. Photosynthesis is an essential process on which the productivity of systems ultimately depends. Maintaining high photosynthetic pigment levels is an important indicator of the plant's physiological state under stress [22]. Our experiments showed that introducing *E. fetida* earthworms into the microcosms increased photosynthetic pigments in lettuce plants (Table 3). Their chlorophyll (*a* and *b*) and carotenoid contents were higher in microcosms with than without earthworms. The chlorophyll *a* content in lettuce leaves increased by 26–82 %, chlorophyll *b* – by 32–80 %, and carotenoid – by 6–65 %, depending on the population size of earthworms in the substrate. Increases in the earthworm population size in the microcosm up to 37 earthworms per kg substrate significantly increased pigment content. The introduction of >37 earthworms decreases pigment content

Table 3

Effect of *Eisenia fetida* abundance on *Lactuca sativa* leaves' photosynthetic pigment content (mg/g fresh weight) ($M\bar{x}$)

Microcosm	Chlorophyll <i>a</i>	Chlorophyll <i>b</i>	Carotenoids
0 worms (Control)	0.57	0.25	0.17
6 worms	0.72*	0.37*	0.18
12 worms	0.83*	0.38*	0.23*
25 worms	0.86*	0.40*	0.25*
37 worms	1.04*	0.45*	0.28*
62 worms	0.72*	0.33	0.22*

Table 4

Effect of *Eisenia fetida* population on *Lactuca sativa* leaf fluorescence values ($M\bar{x}$)

Microcosm	Maximum PS II efficiency, Fv/Fm	Effective PS II quantum yield, Y(II)	Quantum yield of non-regulated non-photochemical fluorescence quenching, Y(NO)	Quantum yield of regulated non-photochemical fluorescence quenching, Y(NPQ)
0 worms (Control)	0.836	0.723	0.165	0.104
6 worms	0.825	0.718	0.163	0.112
12 worms	0.838	0.737	0.157	0.101
25 worms	0.848	0.734	0.163	0.098
37 worms	0.850	0.742	0.153	0.104
62 worms	0.835	0.715	0.167	0.115

below the maximum values, making these microcosms less effective in increasing plant productivity.

The chlorophyll content in plant tissues is determined primarily by the presence and ratio of nutrients in the substrate on which plants grow. Therefore, it can be concluded that worms beneficially increase or change the ratio of the nutrients and trace elements in the substrate for plant cultivation [8, 10, 20]. Increases in photosynthetic pigments in the presence of earthworms are likely due to the enhanced availability of nutrients such as N, P, K, Mg, Fe, and Cu. These are required to produce chlorophyll, which is essential for light harvesting and its conversion into chemical energy via photo-assimilation [8, 23].

Our findings are supported by the fact that earthworm supplementation (*E. fetida*) increased carotenoid, anthocyanin, flavonoids and xanthophyll content in 30- and 60-day-old *Brassica juncea* L. plants [24]. The presence of earthworms in the substrate positively affects plants and their pigment content and the release of small amounts of vermicompost, vermiwash, and humic acids from vermicast into the substrate [11, 20, 24]. During vermicomposting, earthworm-mediated decomposition releases plant-available forms of N, P, and K from organic residues as they ingest organic material,

grind it with a gizzard, and pass it through their gut [12]. Vermicomposting is a biological decomposition process involving the interaction of earthworms and microorganisms to convert different organic waste types into nutrient-rich manure.

In our experiments in microcosms with earthworms (12–62 individuals per kg substrate), we observed a carotenoid content of 29–65 %, depending on the number of earthworms. The highest carotenoid content was in microcosms with 27 earthworms. This outcome can lead to partial infections and greater stress resistance in plants associated with the activation of nonspecific antioxidant systems. Since carotenoids are involved in quenching reactive oxygen species and reducing oxidative stress intensity, maintaining their levels in plants is one factor in plant stress resistance [22]. Carotenoids also contribute to PS II complex formation in the membrane [25]. Therefore, our result may partially indicate greater stress resistance in plants associated with the activation of nonspecific antioxidant systems.

Photosynthesis is an essential process in plants. Most stressors change the course of photosynthetic processes, increasing NPQ and affecting other photosynthetic parameters [26]. The PS II photochemical activity parameters were determined to assess the effect of earth-

worms on lettuce plant photosynthetic function. The F_v/F_m value reflects the potential PS II quantum yield and is a sensitive indicator of the photosynthetic system's functional state [22]. The PS II photochemical activity parameters were studied to assess the effects of introducing earthworms into the substrate and their population size on the lettuce leaf photosynthetic function (Table 4).

In our experiments, introducing earthworms into microcosms caused an increase in F_v/F_m compared to microcosms without earthworms, indicating that the substrate's increased earthworm population did not damage PS II in chloroplasts in lettuce leaves. Similarly, the absence of significant changes in $Y(II)$, $Y(NPQ)$, and $Y(NO)$ values indicates no pronounced stress response of plants to the presence of earthworms. Lettuce plants grown in microcosms with different numbers of earthworms showed similar maximum efficiency and effective PS II quantum yield, with slightly higher values at 12–37 worms per kg substrate. A significant increase in the photochemical quenching coefficient in the experimental microcosms was observed, indicating more open PS II reaction centres. The non-photochemical quenching index tended to be higher in plants grown with earthworms than without them. However, this index was significantly ($p < 0.05$) lower in microcosms with 25 earthworms (0.418) than without earthworms.

Therefore, introducing earthworms into the microcosm did not adversely affect the photosynthetic function of lettuce leaves. It even had a protective effect on the PS II photochemical activity, except with 25 earthworms in the microcosm.

The overall pattern of effects from introducing earthworms, depending on the initial population size, on the lettuce development in microcosms. We noted that the effects of introducing earthworms into the substrate on lettuce generally obeyed Shelford's law of tolerance. Its optimal range is determined by the organism's tolerance to that factor.

A convex curve with an extremum (optimum curve) describes the influence of environmental factors on an organism. This pattern is demonstrated in Figure using the relationship between the mass distribution of lettuce plants and the number of earthworms in the substrate of model ecosystems as an example. This figure shows that the convex curve's extremum corresponds to the number of worms in the substrate at which the maximum lettuce masses are observed (20–40 individuals per kg substrate). Including 37 individuals in the substrate affected the biomass of lettuce plants the most, with a 24 % increase in this microcosm compared to plants in microcosms without earthworms.

Other plant vegetative growth parameters, pigment content, and fluorescence indices can

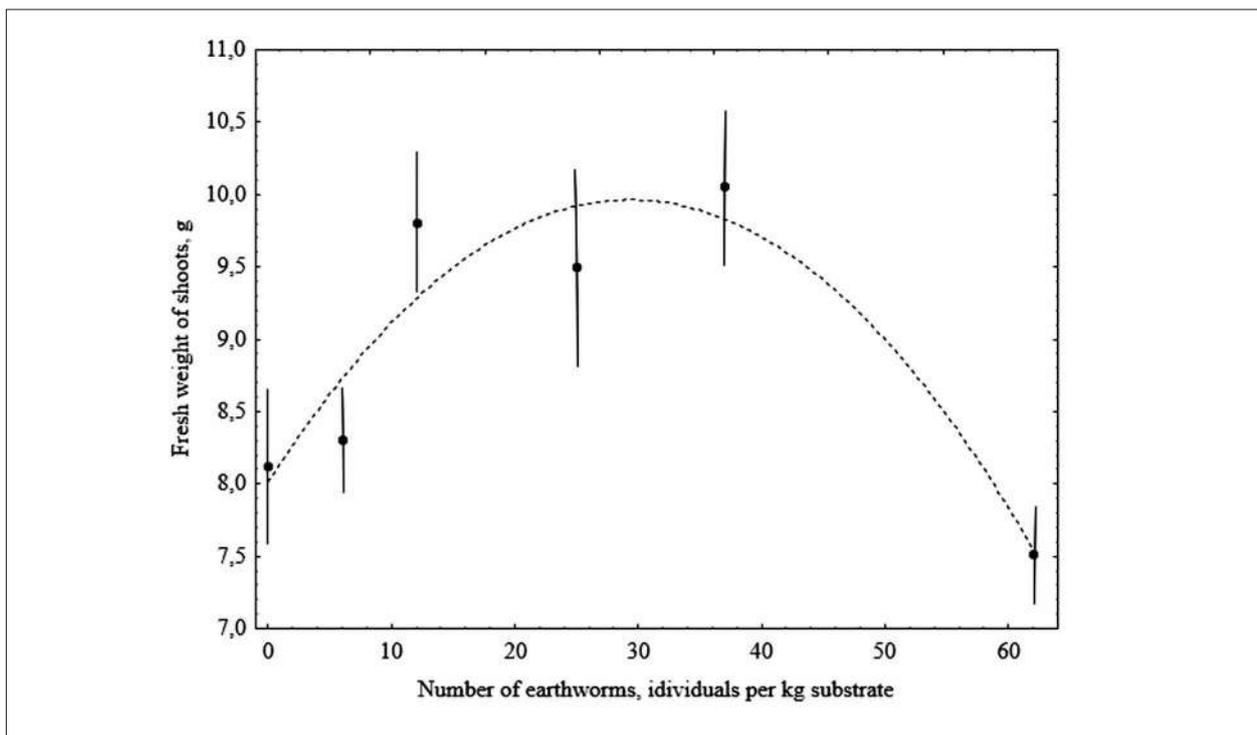


Fig. Effect of *Eisenia fetida* population size on *Lactuca sativa* fresh weight in the microcosm ($M \pm mM$)

be similarly described. According to the data presented, the optimum zone also includes earthworm numbers in the indicated range. The maximum productivity and plant development values were found with 25 and 37 earthworms per kg substrate. Therefore, the effect of the number of earthworms introduced into the model system's substrate had a classical ecological form. It can be described using formulae for optimum (tolerance) curves, the estimation of which can significantly affect the stabilisation and increase in plant productivity in artificial ecosystems.

Conclusion

Successful coexistence of all ecological factors was observed in artificial model systems (microcosms) comprising a substrate (peat and manure), producers (lettuce), and decomposers (earthworms). With all initial population sizes (6–62 earthworms per kg substrate), earthworms reproduced successfully, increasing their population. The size of the earthworm population in the microcosm affected the development and physiological and biochemical parameters of lettuce plants. The classic Shelford's tolerance curve generally characterises population size dependence for earthworms. Plants showed maximum productivity and their highest physiological and biochemical parameters in microcosms with 12–37 earthworms per kg substrate. This finding shows that in artificial biosphere-like systems combining production and reduction processes it is necessary to study the optimal densities of reducers and regulate them during long-term operation for the successful coexistence of all model system components.

The reported study was partly carried out within the State Assignment of the Siberian Federal Scientific Center of Agrobiotechnologies of the Russian Academy of Sciences FNUU-2021-0005.

References

1. Nelson M., Pechurkin N.S., Allen J.P., Somova L.A., Gitelson J.I. Closed ecological systems, space life support and biospherics // *Environmental Biotechnology. Handbook of Environmental Engineering*. V. 10 / Eds. L.K. Wang, V. Ivanov, J.-H. Tay. New York: Humana Press, 2009. P. 517–565. doi: 10.1007/978-1-60327-140-0_11
2. Somova L.A., Pisman T.I., Pechurkin N.S. Simple artificial ecosystems for environmental objectives // *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. 2018. V. 88. No. 1. P. 72–78 (in Russian). doi: 10.7868/S0869587318010097

3. Haanes H., Hansen E.L., Hevrøy T.H., Jensen L.K., Gjelsvik R., Jaworska A., Bradshaw C. Realism and usefulness of multispecies experiment designs with regard to application in radioecology: a review // *Sci. Total Environ*. 2020. V. 718. Article No. 134485. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134485
4. Pechurkin N.S. The biogeochemical principles of Vernadsky as the basis for a new field of science – biospherics // *J. Sib. Fed. Univ. Biol*. 2008. V. 1. No. 3. P. 189–193.
5. Fründ H.C., Butt K., Capowiez Y., Eisenhauer N., Emmerling C., Ernst G., Potthoff M., Schädler M., Schrader S. Using earthworms as model organisms in the laboratory: recommendations for experimental implementations // *Pedobiologia*. 2010. V. 53. P. 119–125. doi: 10.1016/j.pedobi.2009.07.002
6. Blouin M., Hodson M.E., Delgado E.A., Baker G., Brussaard L., Butt K.R., Dai J., Dendooven L., Peres G., Tondoh J.E., Cluzeau D., Brun J.J. A review of earthworm impact on soil function and ecosystem services // *Eur. J. Soil Sci*. 2013. V. 64. P. 161–182. doi: 10.1111/ejss.12025
7. Scheu S. Effects of earthworms on plant growth: patterns and perspectives // *Pedobiologia*. 2003. V. 47. No. 5–6. P. 846–856. doi: 10.1078/0031-4056-00270
8. Van Groenigen J.W., Van Groenigen K.J., Koopmans G.F., Stokkermans L., Vos H.M.J., Lubbers I.M. How fertile are earthworm casts? A meta-analysis // *Geoderma*. 2019. V. 338. No. 1. P. 525–535. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.001
9. Jana U., Barot S., Blouin M., Lavelle P., Laffray D., Repellin A. Earthworms influence the production of above- and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana* // *Soil Biol. Biochem*. 2010. V. 42. No. 2. P. 244–252. doi: 10.1016/j.soilbio.2009.10.022
10. Zyubanova T.I., Minaeva O.M., Akimova E.E., Daibova E.B., Tereshchenko N.N. Effect of preliminary bioconversion of wheat straw on plant productivity in a model nature-like system // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 82–91 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-082-091
11. Belmeskine H., Ouameur W.A., Dilmi N., Aouabed A. The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. // *Heliyon*. 2020. V. 6. No. 8. Article No. e04679. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04679
12. Zhou B., Chen Y.Y., Zhang C., Li J.L., Tang H., Liu J.Y., Dai J., Tang J.C. Earthworm biomass and population structure are negatively associated with changes in organic residue nitrogen concentration during vermicomposting // *Pedosphere*. 2021. V. 31. No. 3. P. 433–439. doi: 10.1016/S1002-0160(20)60089-3
13. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // *Biochem. Soc. Trans*. 1983. V. 11. No. 5. P. 591–592. doi: 10.1042/bst0110591

14. Kreuzer K., Bonkowski M., Langel R., Scheu S. Decomposer animals (Lumbricidae, Collembola) and organic matter distribution affect the performance of *Lolium perenne* (Poaceae) and *Trifolium repens* (Fabaceae) // Soil Biol. Biochem. 2004. V. 36. No. 12. P. 2005–2011. doi: 10.1016/j.soilbio.2004.05.019
15. Coulis M., Bernard L., Gérard F., Hinsinger P., Plassard C., Villeneuve M., Blanchart E. Endogeic earthworms modify soil phosphorus, plant growth and interactions in a legume–cereal intercrop // Plant Soil. 2014. V. 379. P. 149–160. doi: 10.1007/s11104-014-2046-4
16. Braga L.P., Yoshiura C.A., Borges C.D., Horn M.A., Brown G.G., Drake H.L., Tsai S.M. Disentangling the influence of earthworms in sugarcane rhizosphere // Sci. Rep. 2016. V. 6. Article No. 38923. doi: 10.1038/srep38923
17. Xiao Z., Jiang L., Chen X., Zhang Yu., Defosse E., Hu F., Liu M., Rasmann S. Earthworms suppress thrips attack on tomato plants by concomitantly modulating soil properties and plant chemistry // Soil Biol. Biochem. 2019. V. 130. P. 23–32. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.11.023
18. Na L., Abail A., Whalen J.K., Liang B., Hu C.X., Hu R.G., Wu Y.P. Earthworms increase nitrogen uptake by lettuce and change short-term soil nitrogen dynamics // Appl. Soil Ecol. 2022. V. 176. Article No. 104488. doi: 10.1016/j.apsoil.2022.104488
19. Van Groenigen J., Lubbers I., Vos H.M.J., Brown G.G., De Deyn G.B., van Groenigen K.J. Earthworms increase plant production: a meta-analysis // Sci. Rep. 2014. V. 4. Article No. 6365. doi: 10.1038/srep06365
20. Zyubanova T.I., Minaeva O.M., Akimova E.E., Kirillova M.E., Tereshchenko N.N. Effect of various straw/manure ratios in systems with earthworms *Eisenia fetida* on lettuce growth parameters and substrate quality // Sib. J. Life Sci. Agric. 2024. V. 16. No. 2. P. 70–92. doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-2-761
21. Brown G.G., Edwards C.A., Brussaard L. How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms // Earthworm Ecology / Ed. C.A. Edwards. CRC Press, 2004. P. 13–49. doi: 10.1201/9781420039719.ch2
22. Danilova E.D., Zlobin I.E., Kuznetsov V.V., Efimova M.V. Exogenic melatonin reduces the toxic effect of polymetallic stress on barley plants // Dokl. Biochem. Biophys. 2021. V. 499. P. 228–232. doi: 10.1134/S1607672921040049
23. Tanaka M., Takamura T., Watanabe H., Endo M., Yanagi T., Okamoto K. *In vitro* growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs) // J. Hortic. Sci. Biotechnol. 1998. V. 73. No. 1. P. 39–44. doi: 10.1080/14620316.1998.11510941
24. Kaur P., Bali S., Sharma A., Vig A.P., Bhardwaj R. Effect of earthworms on growth, photosynthetic efficiency and metal uptake in *Brassica juncea* L. plants grown in cadmium-polluted soil // Environ. Sci. Pollut. Res. 2017. V. 24. P. 13452–13465. doi: 10.1007/s11356-017-8947-z
25. Maslova T.G., Markovskaya E.F., Slemnev N.N. Functions of carotenoids in leaves of higher plants (review) // Biol. Bull. Rev. 2021. V. 11. P. 476–487. doi: 10.1134/S2079086421050078
26. Sukhov V.S., Gromova E.N., Sukhova E.M., Surova L.M., Nerush V.N., Vodeneev V.A. Analysis of correlations between the indexes of light-dependent reactions of photosynthesis and the photochemical reflectance index (PRI) in pea leaves under short-term illumination // Biochem. Moscow. Suppl. Ser. A. 2019. V. 13. P. 67–77. doi: 10.1134/S1990747818040128

Макрозообентос в различных биотопах вершины бухты Круглой (Чёрное море, Крымский полуостров)

© 2026. М. В. Макаров¹, к. б. н., с. н. с.,

Р. Е. Белогурова^{1,2}, к. б. н., с. н. с.,

¹Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского,
299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2,

²Научно-исследовательский центр пресноводной
и солоноватоводной гидробиологии – филиал ФИЦ ИнБЮМ,
273003, Россия, Херсонская область, г. Херсон, ул. Марии Фортус, д. 87,
e-mail: makarov@ibss-ras.ru

Определён видовой состав и трофическая принадлежность, рассчитаны численность, биомасса, встречаемость макрозообентоса в вершинной части бухты Круглой на рыхлых грунтах и в эпифитоне макрофитов за период с ноября 2022 г. по июль 2023 г. Отмечено 24 вида донной макрофауны на мягких субстратах и 29 видов в зарослях водорослей. Средняя численность на рыхлых поверхностях составила 4169 ± 259 экз./м², средняя биомасса – $10,5 \pm 1,0$ г/м². По этим показателям и встречаемости доминирует брюхоногий моллюск *Hydrobia acuta* Draparnaud, 1805. На основании индекса функционального обилия (ИФО) выделено сообщество этого моллюска. В размерной структуре данного вида в марте и июне преобладали особи размером 2,1–3,0 мм, в июле – менее 2,1 мм. Максимальные численность и биомасса бентоса зафиксированы в ноябре (в среднем 7650 экз./м² и 13,3 г/м²), минимальные – в марте (1875 экз./м² и 2,545 г/м² соответственно). В трофическом отношении по количеству видов, численности и биомассе преобладали детритофаги. В биотопах различных водорослей макрозообентос распространён неравномерно. Так, в эпифитоне цистозире обнаружено 18 видов со средней численностью 1152 экз./кг и средней биомассой 8,7 г/кг; в эпифитоне кладофоры найдено 15 видов, но средняя численность выше – 3861 экз./кг, а средняя биомасса ниже – 2,3 г/кг; на водорослях *Ulva intestinalis* Linnaeus, 1753 обитало 16 видов, но с большими средней численностью (505 экз./кг) и средней биомассой (0,6 г/кг); совместно на цистозире, ульве и кладофоре было 11 видов с численностью 2656 экз./кг и биомассой 3,4 г/кг; в эпифитоне *U. rigida* C. Agardh, 1823 показатели составили: 8 видов, численность 1801 экз./кг, биомасса максимальная – 10 г/кг.

Ключевые слова: вид, численность, биомасса, трофика, субстрат, эпифитон.

Macrozoobenthos in various biotopes of the head of Kruglaya Bay (the Black Sea, Crimea)

© 2026. M. V. Makarov¹ ORCID: 0000-0002-8095-5522^{*}

R. E. Belogurova^{1,2} ORCID: 0000-0002-3101-7708^{*}

¹A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
2, Nakhimova Ave., Sevastopol, Russia, 299011,

²Research Center for Freshwater and Brackish Water Hydrobiology,
Branch of the Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas,
87, Maria Fortus st., Kherson region, Kherson, Russia, 273003,
e-mail: makarov@ibss-ras.ru

The species composition and trophic affiliation were determined, the abundance, biomass, and occurrence of macrozoobenthos were calculated in the head of Kruglaya Bay on loose soils and in the epiphyton of macrophytes for the period from November 2022 to July 2023. 24 species of bottom macrofauna were noted on soft substrates and 29 species in algae thickets. The average number on loose surfaces was 4169 ± 259 ind./m², the average biomass was 10.5 ± 1.0 g/m². In terms of these indicators and occurrence, the gastropod *Hydrobia acuta* Draparnaud, 1805, dominates. The community of the above mollusk was identified based on the functional abundance index (FAI). The size structure of this species in March and June was dominated by individuals measuring 2.1–3.0 mm, in July – less than 2.1 mm. The maximum abundance and biomass of benthos were recorded in November (on average 7650 ind./m² and 13.3 g/m²), the minimum in March (1875 ind./m² and 2.545 g/m², respectively). Detritivores predominate in terms of the number of species, abundance and in biomass. Macrozoobenthos in the biotopes of various algae is distributed unevenly. Thus, 18 species were found with an average abundance of 1152 ind./kg and an average biomass of 8.7 g/kg in the *Cystoseira* epiphyton. We found

15 species in the *Cladophora* epiphyton, but the average abundance was higher – 3861 ind./kg, and the average biomass was lower – 2.3 g/kg. On the *Ulva intestinalis* Linnaeus, 1753, lived 16 species, but with a small average abundance (505 ind./kg) and average biomass (0.6 g/kg). There were 11 species with an abundance of 2656 ind./kg and a biomass of 3.4 g/kg in *Cystoseira* + *Ulva* + *Cladophora* macrophyte associations. We identified 8 species with a number of 1801 ind./kg and 10 g/kg maximum biomass in the epiphyton of *U. rigida* C.Agardh, 1823.

Keywords: species, abundance, biomass, trophic, substrate, epiphyton.

Бухта Круглая – одна из многочисленных бухт Севастополя. Расположение в пределах города и особенность преимущественного режима использования в рекреационном отношении определяют важность исследований состояния её экосистемы. Протяжённость составляет 1,4 км, максимальная ширина 0,9 км. Отдельно следует выделить вершину бухты – это водоём с глубиной до 1–2 м, возникший на месте ранее существовавшего солёного озера, впоследствии соединившегося с морем. Именно в эту часть бухты выведены аварийный сток канализационных вод и ливневой канализации [1]. Ливневый сток вызывает распреснение, увеличивает количество взвешенных частиц и повышает концентрацию биогенов в поверхностном слое и загрязняющих веществ [2]. Содержание нефтепродуктов в ливневых стоках Севастопольского региона в районе бухты Круглой бывает на 1–2 порядка выше, чем в морской воде прибрежных районов, тем не менее, она одна из наименее загрязнённых нефтяными углеводородами в системе севастопольских бухт [3]. Вместе с тем, в последние десятилетия активная застройка берегов бухты различными рекреационными объектами и значительный рост транспортного потока приводят к увеличению антропогенного пресса на экосистему бухты. Макрозообентос бухты Круглой ранее изучали, но в сезонном аспекте и в эпифитоне макрофитов в вершинной части таких работ было немного [4–8]. Таким образом, цель нашего исследования – оценить современное состояние макрозообентоса в вершине бухты Круглой на рыхлых грунтах и в эпифитоне макрофитов в различные сезоны.

Объекты и методы исследования

Пробы отбирали в ноябре 2022 г., марте, июне и июле 2023 г. в вершинной части бухты Круглой непосредственно на участке возле дороги (станция 1) на рыхлых грунтах и макрофитах, на косе у пляжа (станция 2) на рыхлых субстратах и на пляже около пирса (станция 3) в эпифитоне водорослей на глубине около 0,1 м (рис. 1).

Собрано 8 проб с мягких поверхностей и 13 проб макрофитов. С рыхлых грунтов материал отбирали ручным дночерпателем площадью 0,04 м², водоросли помещали в мешки из мельничного газа. В лабораторных условиях пробы промывали через сито с размером ячеек 0,5 мм. Mollusca разбирали не фиксированными, Annelida фиксировали 4% раствором нейтрализованного формалина, Arthropoda – 75% спиртом. Макрозообентос определяли по [9–12]. Таксономическая принадлежность приведена в соответствие со Всемирным реестром морских видов WoRMS [13]. Животных взвешивали на торсионных весах. Рассчитывали численность (экз.) и биомассу (г) видов на единицу площади дна (м²) для проб с рыхлых грунтов и на единицу массы водорослей (кг) для эпифитона макрофитов. Для каждого вида на мягких субстратах считали встречаемость (%). Сообщества выделяли по индексу функционального обилия (ИФО): $N^{0.25} \cdot B^{0.75}$, где N – численность вида, B – биомасса вида [14]. Для оценки вы-

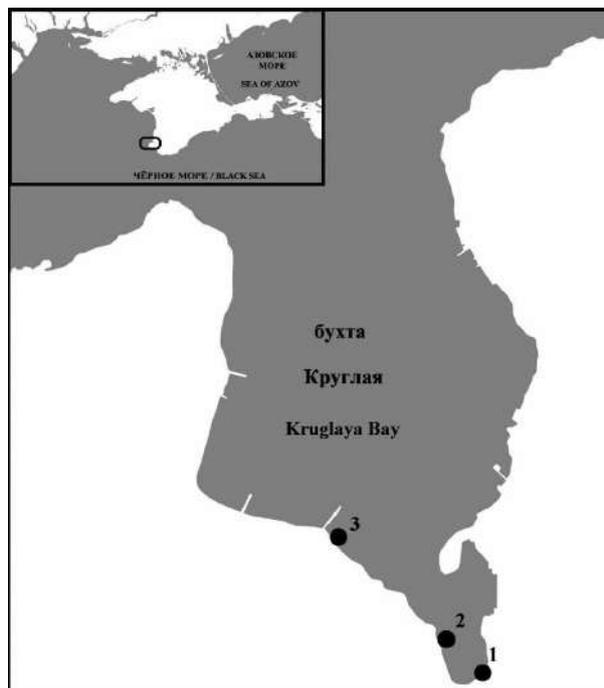


Рис. 1. Станции отбора проб
Fig. 1. Sampling sites (marked with numbers)

Таблица 1 / Table 1

Видовой состав, средняя численность (N, экз./м²) и средняя биомасса (B, г/м²) макрозообентоса на рыхлых грунтах / Species composition, average abundance (N, ind./m²) and average biomass (B, g/m²) of macrozoobenthos on soft sediments

Таксон / Taxon	Станция 1 Sampling site 1		Станция 2 Sampling site 2	
	N	B	N	B
Cnidaria				
Antozoa				
<i>Sagartia undata</i> (Müller, 1778) (= <i>Actinothoe clavata</i>)	6	–	0	0
Plathyhelminthes	13	0,004	67	0,025
Annelida				
Polychaeta				
<i>Capitella capitata</i> (Fabricius, 1780)	0	0	38	0,058
<i>Melinna palmata</i> Grube, 1870	6	0,025	0	0
Nereididae gen. sp.	6	0,004	17	0,063
<i>Hediste diversicolor</i> (O.F. Müller, 1776)	94	1,917	17	0,005
<i>Fabricia stellaris</i> (Müller, 1774)	6	0,001	17	0,003
<i>Perinereis cultrifera</i> (Grube, 1840)	6	–	0	0
<i>Polydora cornuta</i> Bosc, 1802	6	0,004	0	0
<i>Salvatoria clavata</i> (Claparède, 1863)	34	0,014	50	0,01
<i>Sphaerosyllis bulbosa</i> Southern, 1914	6	0,008	0	0
Clitellata				
Olygochaeta g. sp	256	0,088	113	0,033
Mollusca				
Bivalvia				
<i>Abra segmentum</i> (Récluz, 1843)	31	0,963	13	0,138
<i>Cerastoderma glaucum</i> (Bruguière, 1789)	13	0,113	6	0,05
<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)	113	2,444	19	0,025
<i>Parvicardium exiguum</i> (Gmelin, 1791)	6	0,625	0	0
Gastropoda				
<i>Hydrobia acuta</i> Draparnaud, 1805	5694	10,538	656	1,231
<i>Setia valvatoides</i> Milaschewitsch, 1909	13	0,013	0	0
Arthropoda				
Malacostraca				
<i>Ampithoe ramondi</i> Audouin, 1826	6	0,001	0	0
<i>Gammarus insensibilis</i> Stock, 1966	19	0,114	0	0
<i>Microdeutopus</i> sp.	50	0,019	0	0
<i>Monocorophium acherusicum</i> (A. Costa, 1853)	19	0,006	0	0
<i>Stenothoe monoculoides</i> (Montagu, 1813)	6	0,001	0	0
Hexapoda				
Chironomidae (lar.)	38	0,005	13	–
Copepoda				
Harpacticoida	500	0,015	413	0,001
Всего / Total	6925 ± 713	16,94 ± 1,62	1402 ± 167	1,67 ± 0,22

равненности видов в сообществе построены кривые доминирования-разнообразия, где ось абсцисс – ранжированный ряд от наиболее многочисленного вида к наименее многочисленному, а ось ординат – средняя численность видов [15]. Трофическую принадлежность видов определяли на основании литературных данных [10–12, 16]. Для определения фаунистического сходства использовался индекс Чекановского-Сёренсена [17]:

$$I = \frac{2c}{(a + b)} \quad (1)$$

где a и b – число видов в сравниваемых списках, c – число общих видов.

Для оценки видового разнообразия рассчитывали индекс Шеннона [10]:

$$H = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (2)$$

где n – число видов в анализируемой выборке, p_i – количество особей i -го вида.

Для определения размерной структуры гидробий измеряли высоту их раковины (мм) штангенциркулем. Солёность воды (‰) измеряли кондуктомером PAL-06S, температуру (°C) – термометром.

Результаты и обсуждение

Макрозообентос рыхлых грунтов бухты Круглой. На рыхлых грунтах в вершине

бухты Круглой в 2022–2023 гг. обнаружено 24 вида макрозообентоса, относящиеся к типам: Annelida (10 видов), Platyhelminthes, Mollusca (6 видов) и Arthropoda (7 видов). Не определённые до вида животные фигурируют в подсчётах как один вид (табл. 1).

Среди Mollusca преобладают эврибионтные виды (*A. segmentum*, *C. glaucum*, *M. lineatus*, *H. acuta*) [11, 18]. Гидробия – типичный обитатель вершинных частей бухт [11]. *S. valvatooides* – эвритермный моллюск, переносящий температуру до +30 °C и выдерживающий понижение солёности до 10–12 ‰ [11]. На станции 1 температура воды в июле составила +29 °C, а солёность в целом колебалась в диапазоне 14–16 ‰.

Средняя численность макрозообентоса составила 4169 ± 259 экз./м², средняя биомасса – $10,52 \pm 0,98$ г/м². По этим показателям и встречаемости (88 %) значительно доминирует *H. acuta*. Этот вид образует одноимённое сообщество как в целом в этой части акватории бухты, так и на каждой станции в отдельности. Виды в данном сообществе распределены неравномерно (рис. 2). Значительно доминирует один вид – *H. acuta*. Падение кривой существенное, что говорит о неблагоприятных условиях обитания.

Индекс видового разнообразия Шеннона для макрозообентоса рыхлых грунтов оказался невысоким – 1,47, что характерно для сообществ с резким доминированием одного

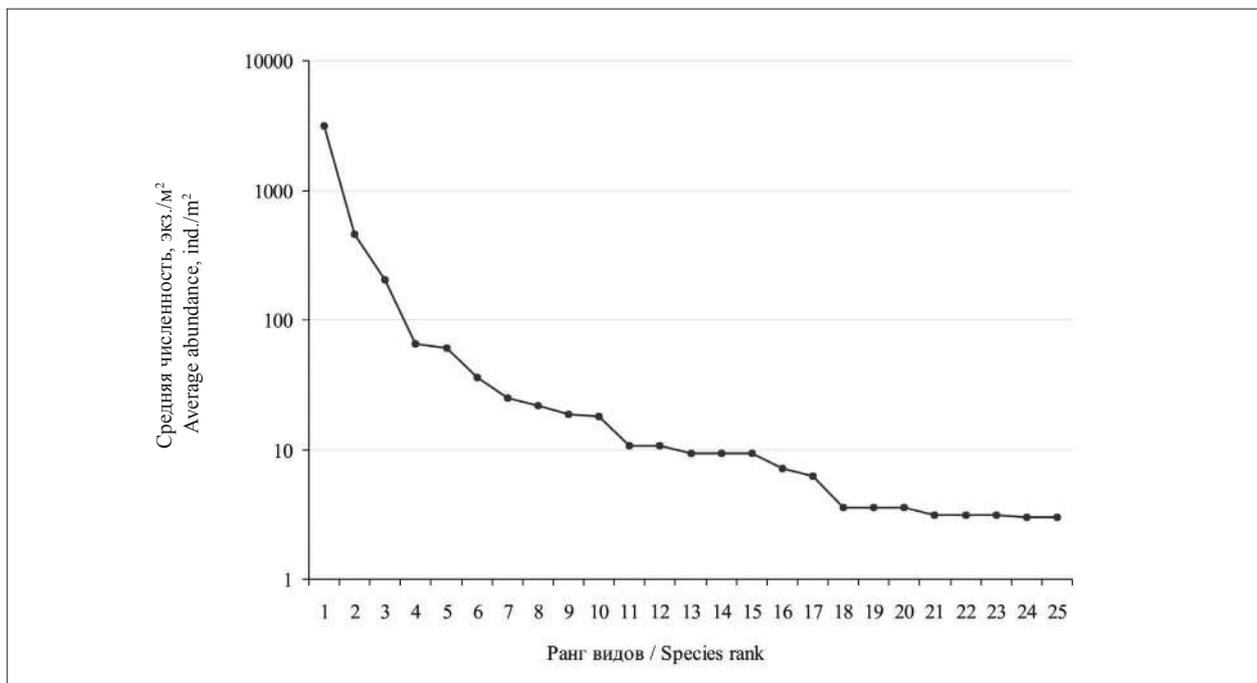


Рис. 2. Доминирование-разнообразие видов в сообществе *H. acuta*
 Fig. 2. Species dominance-diversity in the *H. acuta* community

вида: так, например, в бухте Голландия (Севастополь) на рыхлых грунтах вблизи причалов этот показатель составил 1,03–1,9 и преобладал другой вид *Gastropoda* – *Tritia reticulata* (Linnaeus, 1758) [19].

Для сравнения, в вершине бухты Стрелецкая в ноябре 2003 г. также было обнаружено 24 вида макрозообентоса, но с преобладанием сообщества *A. segmentum* – *H. diversicolor* [20]. Коэффициент общности видов в данном районе в 2003 г. и бухте Круглой в 2022–2023 гг. невысокий – 0,42. В вершине Севастопольской бухты – эстуарии р. Чёрной в 2019–2020 гг. отмечено 38 видов донной макрофауны и выделены другие сообщества: *C. glaucum* – *A. segmentum*, *C. glaucum* и *M. lineatus* [21]. Коэффициент общности видов Чекановского-Сёренсена в этом районе и бухте Круглой низкий – 0,35.

Трофическая принадлежность разнообразная и включает в себя пищевые группы: детритофаги, полифаги, сестонофаги, плотоядные, фитофаги и прочие. По количеству видов (8; 33 %), численности (3248 экз./м²; 78 %) и биомассе (7,4 г/м²; 70 %) преобладают детритофаги – преимущественно за счёт *H. acuta*.

В сезонной динамике численности и биомассы макрозообентоса максимумы отмечены в ноябре (7650 экз./м² и 13,28 г/м² соответственно) благодаря высоким показателям гидробий. Также относительно высокая биомасса зафиксирована в июле (10,95 г/м²) преимущественно за счёт митилястеров, минимумы – в марте (1875 экз./м² и 2,5 г/м²) при температуре воды 10–11 °С, когда, вероятно, ещё не началось размножение *H. acuta*.

В размерной структуре *H. acuta* в конце марта и начале июня доминировали особи размером 2,1–3,0 мм (59–100 %), в начале июля – размером менее 2,1 мм (55 %). Гидробии размножаются в апреле–мае, и, вероятно, в июле, когда завершается оседание личинок, отмечается много молоди [11].

По собственным данным, в 2001–2002 гг. в вершине бухты Круглой было обнаружено 10 видов *Gastropoda*, но средняя численность составила всего 270 экз./м². Также преобладала *H. acuta* (средняя численность 190 экз./м²).

Эпифитон макрофитов бухты Круглой. В эпифитоне макрофитов в 2022–2023 гг. отмечено 29 видов донной макрофауны, относящихся к типам: Annelida (3 вида), Mollusca (8 видов) и Artropoda (18 видов). Неопределённые до вида животные также фигурируют как один вид (табл. 2).

В эпифитоне *Cladophora* sp. обнаружено 15 видов макрозообентоса. В этом биотопе у

берегов Крыма исследования всей донной макрофауны ранее проводили только в устье бухты Круглой в 2009–2010 гг. и было отмечено 10 видов [7]. Наши данные дополнили список видов полихетой *G. tuberculata*, гастроподами *S. valvatooides* и *P. interstincta*, ракообразными *Cumella* (*Cumella*) *limicola*, *G. insensibilis*, *M. acherusicum* и *S. monoculoides*.

Максимальное количество видов (18) найдено на цистозире. Поскольку она не определена до вида, а обитающие в Чёрном море два вида в современной номенклатуре относятся к разным родам, мы здесь использовали прежнее название рода *Cystoseira*. У неё кустистый, разветвлённый таллом высотой 10–120 см. Обитает на камнях или скалах на глубинах от 0,5 до 10 м, редко до 30 м [22]. В бухте Круглой она встречена нами на глубине 0,1 м. Из макрозообентоса следует отметить *H. acuta*, которая нечасто встречается на цистозире. Однако, отсутствует *T. pullus* – вид, более характерный для зарослевых биоценозов [16].

Макрозообентос в зарослях водорослей *U. intestinalis* у побережья Крыма ранее не исследован, поэтому все виды, встреченные в данном биотопе, отмечены там впервые. Минимальное количество видов обнаружено в эпифитоне *U. rigida* (8). Ульвовые фитоценозы занимают самую мелководную часть побережья, приурочены к защищённым и загрязнённым участкам моря. Заросли ульвы часто встречаются вблизи крупных населённых пунктов и возле выходов канализационных стоков [22]. Эпифитон ульвы мало исследован: у побережья Севастополя в 1975–1990 гг. в данном биотопе было отмечено 47 видов макрозообентоса [23]. В 2009–2010 гг. на глубине 3 м в бухте Круглой найдено 13 видов [7]. Наши данные дополнили список видов *M. acherusicum*.

Проведено сравнение видового состава животных на водорослях (табл. 3).

Сходство видов в целом невысокое, преимущественно около 0,5. Ещё ниже оно у эпифитона *U. rigida* с макрозообентосом некоторых других водорослей (0,34–0,35). В 2009–2010 гг. коэффициенты сходства видов Чекановского-Сёренсена на *U. rigida* – *Cystoseira* sp. и *U. rigida* – *Cladophora* sp. были несколько выше (0,5 и 0,55 соответственно) [7].

Наибольшая численность (3861 ± 204 экз./кг) макрозообентоса отмечена в эпифитоне *Cladophora* sp. Это нитчатая зелёная водоросль с талломами в виде длинных разветвлённых нитей, обитающая на скалах,

Таблица 2 / Table 2

Видовой состав, средняя численность (экз./кг, над чертой) и средняя биомасса (г/кг, под чертой) макрозообентоса в зарослях макрофитов / Species composition, average abundance (individuals/kg, above the line) and average biomass (g/kg, below the line) of macrozoobenthos in macrophyte thickets

Таксон / Taxon	<i>Cystoseira</i> sp.	<i>Cladophora</i> sp.	<i>Ulva</i> <i>intestinalis</i>	<i>U. rigida</i>	<i>Cystoseira</i> + <i>Cladophora</i> + <i>Ulva</i>
Annelida					
<i>Genetyllis tuberculata</i> (Bobretzky, 1868)	<u>10</u> 0,01	<u>32</u> 0,064	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Nereididae</i> gen. sp.	<u>23</u> 0,011	<u>0</u> 0	<u>6</u> 0,003	<u>267</u> 0,667	<u>0</u> 0
<i>Polyophtalmus pictus</i> (Dujardin, 1839)	<u>13</u> 0,013	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
Mollusca					
Bivalvia					
<i>Mytilaster lineatus</i> (Gmelin, 1791)	<u>103</u> 2,903	<u>449</u> 0,449	<u>101</u> 0,085	<u>0</u> 0	<u>360</u> 0,36
Gastropoda					
<i>Bittium reticulatum</i> (da Costa, 1778)	<u>177</u> 1,86	<u>64</u> 0,994	<u>7</u> 1,86	<u>200</u> 1,6	<u>90</u> 1,622
<i>Hydrobia acuta</i> Draparnaud, 1805	<u>41</u> 0,123	<u>0</u> 0	<u>14</u> 0,123	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Parthenina interstincta</i> (J. Adams, 1797)	<u>0</u> 0	<u>32</u> 0,032	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Rissoa splendida</i> Eichwald, 1830	<u>295</u> 3,543	<u>289</u> 0,289	<u>54</u> 0,054	<u>600</u> 4,67	<u>1306</u> 1,306
<i>R. venusta</i> R. A. Philippi, 1844	<u>13</u> 0,013	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Setia valvatoides</i> Milaschewitsch, 1909	<u>13</u> 0,013	<u>193</u> 0,193	<u>14</u> 0,014	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Tricolia pullus</i> (Linnaeus, 1758)	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>6</u> 0,006	<u>133</u> 3,47	<u>0</u> 0
Arthropoda					
Malacostraca					
Amphipoda sp.					
	<u>107</u> 0,001	<u>16</u> 0,002	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Ampithoe ramondi</i> Audouin, 1826	<u>38</u> 0,12	<u>0</u> 0	<u>47</u> 0,015	<u>400</u> 0,2	<u>135</u> 0,059
<i>Ampithoe</i> sp.	<u>0</u> 0	<u>16</u> 0,002	<u>54</u> 0,004	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Apohyale perieri</i> (Lucas, 1846)	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>8</u> 0,031	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Biancolina algicola</i> Della Valle, 1893	<u>13</u> 0,003	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Caprella acanthifera</i> Leach, 1814	<u>46</u> 0,013	<u>2148</u> 0,125	<u>50</u> 0,007	<u>0</u> 0	<u>315</u> 0,05
<i>Chondrochelia</i> <i>savignyi</i> (Kroyer, 1842)	<u>143</u> 0,031	<u>161</u> 0,016	<u>0</u> 0	<u>67</u> 0,003	<u>180</u> 0,018
<i>Cumella</i> (<i>Cumella</i>) <i>limicola</i> Sars, 1879	<u>0</u> 0	<u>32</u> 0,002	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Dexamine spinosa</i> (Montagu, 1813)	<u>0</u> 0	<u>32</u> 0,007	<u>41</u> 0,019	<u>0</u> 0	<u>45</u> 0,005
<i>Gammarus insensibilis</i> Stock, 1966	<u>0</u> 0	<u>48</u> 0,075	<u>7</u> 0,023	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0

Окончание таблицы 2

Таксон / Taxon	<i>Cystoseira</i> sp.	<i>Cladophora</i> sp.	<i>Ulva</i> <i>intestinalis</i>	<i>U. rigida</i>	<i>Cystoseira+</i> <i>Cladophora+Ulva</i>
<i>Idotea balthica</i> (Pallas, 1772)	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>52</u> 0,202	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
<i>Microdeutopus</i> sp.	<u>35</u> 0,01	<u>0</u> 0	<u>41</u> 0,003	<u>67</u> 0,007	<u>45</u> 0,005
<i>Monocorophium</i> <i>acherusicum</i> (A. Costa, 1853)	<u>0</u> 0	<u>32</u> 0,007	<u>0</u> 0	<u>67</u> 0,027	<u>0</u> 0
<i>Plumulojassa oia</i> (Spence Bate & Westwood, 1862)	<u>13</u> 0,001	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>45</u> 0,005
<i>Stenosoma capito</i> (Rathke, 1837)	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>90</u> 0,01
<i>Stenothoe monoculoides</i> (Montagu, 1813)	<u>53</u> 0,001	<u>321</u> 0,042	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>45</u> 0,002
Hexapoda					
Chironomidae (lar.)	<u>13</u> 0,003	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
Copepoda					
Harpacticoida	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>6</u>	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0
Всего / Total	<u>1152±31</u> 8,7±0,4	<u>3861±204</u> 2,3±0,1	<u>505±13</u> 0,6±0,02	<u>1801±97</u> 10,0±0,8	<u>2656±148</u> 3,4±0,2

Таблица 3 / Table 3

Коэффициент сходства видов макрозооэпифитона Чекановского-Сёренсена
Chekanovsky-Sørensen coefficient of similarity between macrozoeriphyton species

Вид / Species	<i>Cystoseira</i> sp.	<i>Cladophora</i> sp.	<i>Ulva</i> <i>intestinalis</i>	<i>U.</i> <i>rigida</i>	<i>Cystoseira+</i> <i>Ulva+Cladophora</i>
<i>Cystoseira</i> sp.		0,55	0,53	0,46	0,55
<i>Cladophora</i> sp.	0,55		0,52	0,35	0,54
<i>Ulva intestinalis</i>	0,53	0,52		0,5	0,52
<i>U. rigida</i>	0,46	0,35	0,5		0,34
<i>Cystoseira+Ulva+</i> <i>Cladophora</i>	0,55	0,54	0,52	0,34	

Примечание: прочерк означает, что индикатор не имеет смысла.
Note: a dash means that indicator doesn't make sense.

камнях, ракушке, песке [22]. Среди донной макрофауны доминирует амфипода *C. acanthifera* (56 %).

Максимальная биомасса (10,04 ± 0,75 г/кг) макрозооэпифитона была на *U. rigida*. Наибольший вклад (47 %) внесла гастропода *R. splendida*. Это эвритоппный вид, в том числе характерный для зарослевых сообществ [12, 16]. В 1975 г. у побережья Севастополя *R. splendida* также достигала высокой биомассы в эпифитоне *U. rigida*, хотя и уступала по этому показателю *I. balthica*, *T. pullus* и *M. lineatus* [23].

По ИФО выделены следующие сообщества: брюхоногого моллюска *R. splendida* в эпифитонах водорослей *Cystoseira* sp., *U. rigida* и ассоциациях *Cystoseira* sp. + *Ul-*

va sp. + *Cladophora* sp.; двусторчатого моллюска *M. lineatus* на *Cladophora* sp. и изоподы *I. balthica* в зарослях *U. intestinalis*. Моллюск *R. splendida* образовывал одноимённые сообщества в эпифитоне *Cystoseira* sp. в других районах черноморского побережья: Тарханкут (Северо-Западный Крым), Симеиз (южный берег Крыма) и Утриш (Западный Кавказ). В бухте Круглой на глубинах 1–5 м отмечено сообщество другой гастроподы – *B. reticulatum* [24].

Для оценки состояния сообществ построенные кривые доминирования-разнообразия (рис. 3).

Наибольшее доминирование отмечено в эпифитоне *Cladophora* sp. благодаря высокой численности *C. acanthifera*. Наименьшая длина кривой – на водоросли *U. rigida*. На них,

вероятно, наименее благоприятные условия обитания животных. Меньшее доминирование и длинные кривые позволяют предположить, что наиболее благоприятные условия обитания макрозообентоса на *U. intestinalis* и *Cystoseira* sp. Ранее, на глубинах 1, 3 и 5 м в эпифитоне цистозире также отмечались относительно благоприятные условия для макробентосных животных [24].

Показатель видового разнообразия Шеннона для сообществ на макрофитах бухты Круглой изменялся от 2,34 (в эпифитоне *Cladophora* sp.) до 3,49 (в эпифитоне *U. intestinalis*). В эпифитоне *U. rigida* он составил 2,58; в зарослях водорослей рода *Cystoseira* – 3,42. В целом, данные показатели подтверждают, что наибольшее доминирование одного вида наблюдалось на *Cladophora* sp., а наименьшее – на *U. intestinalis* и *Cystoseira* sp.

Население эпифитонных сообществ обладало широким пищевым спектром: представлены детритофаги, фитофаги, сестонофаги, полифаги, плотоядные (эктопаразиты) и прочие. По количеству видов в целом преобладают детритофаги и фитофаги (по 9

видов), но на разных водорослях есть различия. Так, на *U. intestinalis* больше фитофагов (7 видов), на *Cystoseira* sp. и в ассоциациях *Cystoseira* sp. + *Ulva* sp. + *Cladophora* sp. и *Cladophora* sp. – детритофагов (6; 6 и 5 видов соответственно), на *U. rigida* – фитофагов и детритофагов по 3 вида. Это, вероятно, связано с разными свойствами макрофитов, например, с разветвленностью слоевища. Она особое влияние оказывает на ту часть животных, которые питаются диатомовыми обрастаниями [16]. В группу детритофагов максимальный вклад вносят Crustacea, в группу фитофагов – Gastropoda и Crustacea. По численности на кладофоре преобладают детритофаги (из них многочисленна *C. acanthifera*), на других водорослях – фитофаги. По биомассе на *Cladophora* sp., *U. intestinalis* и совместно на цистозире, ульве и кладофоре доминируют полифаги благодаря гастроподе *B. reticulatum*, а на *Cystoseira* sp. и *U. rigida* – фитофаги.

Роль макрозообентоса в питании рыб бухты Круглой. Как известно, водные беспозвоночные – один из важных компонентов в питании зоофагов. По современным данным,

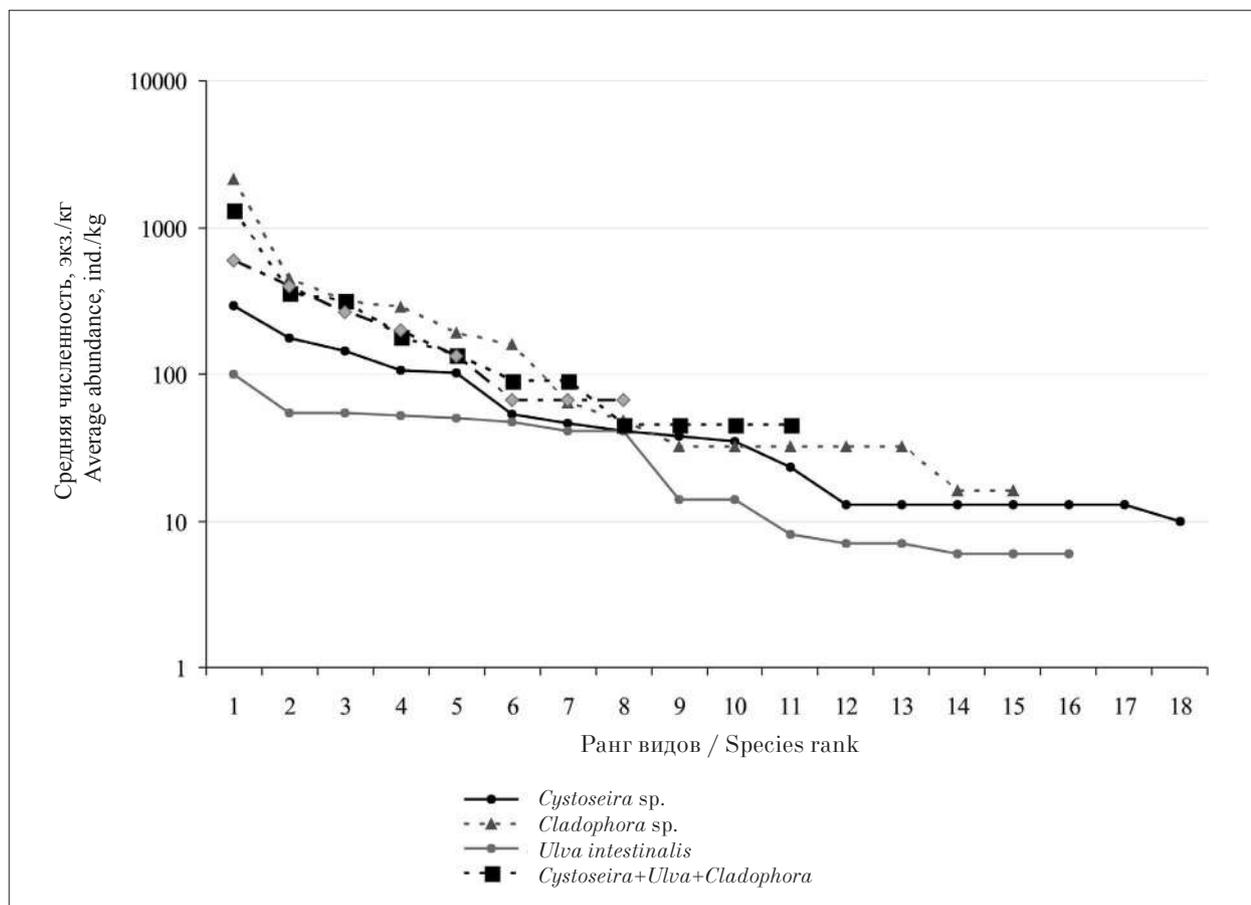


Рис. 3. Доминирование–разнообразие видов в различных сообществах
 Fig. 3. Species dominance–diversity in various communities

ихтиофауна бухты Круглой представлена 60 видами рыб, большинство из которых являются осёдлыми, и, по меньшей мере, 20 из них – бентофаги [25–27]. Наиболее многочисленную группу рыб-бентофагов образуют бычковые Gobiidae – это бычки чёрный (*Gobius niger* Linnaeus, 1758), травяник (*G. ophiocephalus* (Pallas, 1814)), паганель (*G. paganellus* Linnaeus, 1758), кругляк (*Neogobius melanostomus* (Pallas, 1814)), лысун Бата (*Pomatoschistus bathi* Miller, 1982) и леопардовый лысун (*P. marmoratus* (Risso, 1810)). Так, согласно исследованиям питания рыб из Севастопольской бухты, прибрежные рыбы питаются массовыми формами макрозообентоса [26]. В желудках бычка-кругляка преобладали моллюски (кардиум *Cardium* sp., риссоа *Rissoa* sp., мидия *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 и некоторые другие); у султанки из этого района обнаружены моллюски *Polititapes* sp., *Modiolus* sp., *M. galloprovincialis*, а также полихеты (*Nereis* sp.), Amphipoda и Decapoda.

Вторую по численности группу рыб из бухты Круглой, в спектр питания которой входят бентосные организмы, образуют губановые Labridae. Рябчик *Symphodus cinereus* Bonnaterre, 1788, глазчатый губан *S. ocellatus* Forsskål, 1775 и перепелка *S. roissali* (Risso, 1810) предпочитают мелких ракообразных, гастропод и двустворчатых моллюсков, а рулена *S. tinca* (Linnaeus, 1758) питается преимущественно *Mytilaster lineatus* Gmelin, 1791 [26].

Заключение

В вершинной части бухты Круглой в ноябре 2022 – июле 2023 гг. отмечено 24 вида донной макрофауны на мягких субстратах и 29 видов в зарослях водорослей. Средняя численность на рыхлых поверхностях составила 4169 ± 259 экз./м², средняя биомасса – $10,50 \pm 0,98$ г/м². Доминирует брюхоногий моллюск *Hydrobia acuta*. По индексу функционального обилия он образует одноимённое сообщество. Максимальные численность и биомасса макрозообентоса зафиксированы в ноябре (в среднем 7650 экз./м² и $13,3$ г/м²), минимальные – в марте (1875 экз./м² и $2,5$ г/м² соответственно). В трофическом отношении по количеству видов, численности и биомассе преобладали детритофаги. Максимальное количество видов обнаружено в эпифитоне *Cystoseira* sp. – 18. Наибольшая численность отмечена в эпифитоне *Cladophora* sp. – 3861 экз./кг. Самая высокая биомасса животных была на водорослях *Ulva rigida* – 10 г/кг.

Выделены сообщества: *Rissoa splendida* в эпифитонах водорослей *Cystoseira* sp., *Ulva rigida* совместно на цистозире, ульве и кладофоре; *Mytilaster lineatus* на *Cladophora* sp. и *Idothea balthica* в зарослях *Ulva intestinalis*. В трофическом отношении на *U. intestinalis* больше всего фитофагов, на *Cystoseira* sp. и совместно на цистозире, ульве и кладофоре и *Cladophora* sp. – детритофагов, на *U. rigida* – фитофагов и детритофагов поровну. По численности на *Cladophora* sp. преобладали детритофаги, на других водорослях – фитофаги. По биомассе на *Cladophora* sp., *U. intestinalis* и совместно на цистозире, ульве и кладофоре доминировали полифаги, а на *Cystoseira* sp. и *U. rigida* – фитофаги.

Авторы признательны младшему научному сотруднику отдела экологии бентоса ФИЦ ИнБЮМ Л. В. Бондаренко за определение Arthropoda и младшему научному сотруднику того же отдела и института Д. В. Подзоровой за определение Annelida, а также обеим сотрудницам за ценные замечания по тексту статьи.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации 124022400148-4), а также частично в рамках темы НИЦ ПСГ – филиал ФИЦ ИнБЮМ «Оценка и развитие рыбохозяйственного потенциала перспективных районов Северного Причерноморья» (№ гос. регистрации 125012100509-6).

Литература

1. Куфтаркова Е.А., Родионова Н.Ю., Губанов В.И., Бобко Н.И. Гидрохимическая характеристика отдельных бухт севастопольского взморья // Труды ЮгНИРО. 2008. Т. 46. С. 110–117.
2. Беляева О.И. Проблема нефтяного загрязнения ливневых стоков в морской береговой зоне Севастопольской бухты (обзор) // Ученые записки ТНУ имени В.И. Вернадского. Сер.: География. 2004. Т. 17. № 4. С. 105–112.
3. Миронов О.Г., Кирюхина Л.Н., Алёмов С.В. Санитарно-биологические аспекты экологии севастопольских бухт в XX веке. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2003. 185 с.
4. Зернов С.А. К вопросу об изучении жизни Чёрного моря. СПб.: Тип. Императорской Акад. наук, 1913. 299 с.
5. Копий В.Г. Макрозообентос в прибрежной зоне бухт Севастополя (Крымское побережье Чёрного моря) // Морський екологічний журнал. 2011. № 2. С. 43–48.

6. Алёмов С.В., Витер Т.В., Гусева Е.В. Многолетние изменения состояния сообществ макрозообентоса бухты Круглая (регион Севастополя) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 2. С. 59–66. doi: 10.22449/2413-5577-2019-2-59-66
7. Макаров М.В., Бондаренко Л.В., Копий В.Г. Донная фауна бухты Круглой (Чёрное море, Крым). Сообщение I. Эпифитон макрофитов // Труды Карадагской научной станции имени Т.И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2022. Т. 7. № 1. С. 11–26. doi: 10.21072/есо.2022.21.02
8. Болтачева Н.А., Ревков Н.К., Бондаренко Л.В., Макаров М.В., Надольный А.А. Донная фауна бухты Круглой (Чёрное море, Крым). Сообщение II. Таксономический состав и количественное развитие макрозообентоса рыхлых грунтов // Труды Карадагской научной станции им. Т. И. Вяземского – природного заповедника РАН. 2022. Т. 7. № 2 (22). С. 3–22. doi: 10.21072/есо.2022.22.01
9. Определитель фауны Чёрного и Азовского морей: в 3 т. Т. 3. Киев: Наукова думка, 1972. 340 с.
10. Грезе И.И. Амфиподы Чёрного моря и их биология. Киев: Наукова думка, 1977. 156 с.
11. Чухчин В.Д. Экология брюхоногих моллюсков Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1984. 176 с.
12. Киселёва М.И. Многощетинковые черви (Polychaeta) Чёрного и Азовского морей. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2004. 409 с.
13. World register of marine species [Электронный ресурс] <http://www.marinespecies.org/> (Дата обращения: 13.12.2023).
14. Мальцев В.И. О возможности применения показателя функционального обилия для структурных исследований зооценозов // Гидробиологический журнал. 1990. Т. 26. № 1. С. 87–89.
15. Whittaker R.H. Dominance and diversity in land plant communities: numerical relations of species express the importance of competition in community function and evolution // Science. 1965. V. 147. No. 3655. P. 250–260. doi: 10.1126/science.147.3655.250
16. Маккавеева Е.Б. Беспозвоночные зарослей макрофитов Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1979. 229 с.
17. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.
18. Копий В.Г., Бондаренко Л.В. Атлас обитателей псевдолиторали Азово-Черноморского побережья Крыма. Севастополь: ООО Полиграфический комплекс КИА, 2020. 120 с. doi: 10.21072/978-5-6044865-1-1
19. Витер Т.В. Донные сообщества в районе причалов б. Голландия и в районе ГРЭС (б. Севастопольская) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2013. № 27. С. 431–438.
20. Колесникова Е.А., Болтачева Н.А., Макаров М.В. Макробентос кутовой части бухты Стрелецкой // Наукові записки Тернопільського Національного педагогічного університету. Сер.: Біологія. Спец. вип. Гідроєкологія. 2005. Т. 4. С. 287–289.
21. Макаров М.В., Витер Т.В. Пространственно-временные изменения в макрозообентосе устья реки Чёрной и вершины Севастопольской бухты (Юго-Западный Крым) // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2021. Т. 7. № 4. С. 92–107.
22. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Чёрного моря. Киев: Наукова думка, 1975. 248 с.
23. Маккавеева Е.Б. Эпифитон зарослей зелёной ульвы (*Ulva rigida*) // Экология моря. 1992. Т. 42. С. 20–24.
24. 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) // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2020. Т. 6. № 3. С. 97–116. doi: 10.37279/2413-1725-2020-6-3-97-116
25. Гирагосов В.Е., Мильчакова Н.А., Карпова Е.П., Ковардаков С.А., Бондарева Л.В. Биологическое разнообразие бухты Круглой и перспективы создания орнитологического заказника (юго-западный Крым, Чёрное море) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 179–185. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-179-185
26. Шевченко Н.Ф. Видовой состав и количественное распределение рыб в бухтах и районе Севастополя // Ихтиофауна черноморских бухт в условиях антропогенного воздействия. Киев: Наукова думка, 1993. С. 77–86.
27. Болтачёв А.Р., Карпова Е.П. Ихтиофауна прибрежной зоны Севастополя (Чёрное море) // Морской экологический журнал. 2012. Т. 11. № 2. С. 10–27.

References

1. Kuftarkova E.A., Rodionova N.Yu., Gubanov V.I., Bobko N.I. Hydrochemical characteristics of several bays of the Sevastopol coast // Trudy YugNIRO. 2008. V. 46. P. 110–117 (in Russian).
2. Belyaeva O.I. The problem of oil pollution of storm drains in the sea coastal zone of Sevastopol Bay: a review // Uchenye zapiski TNU im. V.I. Vernadskogo. Geografiya. 2004. V. 17. No. 4. P. 105–112 (in Russian).
3. Mironov O.G., Kirjukhina L.N., Alyomov S.V. Sanitary-biological aspects of the Sevastopol bays ecology in XX century. Sevastopol: ECOSI-Gidrofyzika, 2003. 185 p. (in Russian).
4. Zernov S.A. On the issue of studying the life of the Black Sea. Sankt-Peterburg: Tipografiya Imperatorskoy Akademii nauk, 1913. 299 p. (in Russian).

5. Kopyi V.G. Macrozoobenthos in the coastal zone of Sevastopol bays (Crimean Black Sea near-coast) // Marine ecological journal. 2011. No. 2. P. 43–48 (in Russian).
6. Alyomov S.V., Viter T.V., Guseva E.V. Long-term changes of the state of macrozoobenthos communities in the Kruglaya Bay (Sevastopol) // Ecological safety of coastal and shelf zones of sea. 2019. V. 2. P. 59–66 (in Russian). doi: 10.22449/2413-5577-2019-2-59-66
7. Makarov M.V., Bondarenko L.V., Kopyi V.G. Fauna of Kruglaya Bay (the Black Sea, Crimea). Part 1. Epiphyton of macrophytes // Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag scientific station – Nature Reserve of the RAS. 2022. V. 7. No. 1. P. 11–26 (in Russian). doi: 10.21072/eco.2022.21.02
8. Boltacheva N.A., Revkov N.K., Bondarenko L.V., Makarov M.V., Nadolny A.A. Bottom fauna of Kruglaya Bay (Black Sea, Crimea). Message II. Taxonomic composition and quantitative development of macrozoobenthos in loose soils // Proceedings of the Karadag Scientific Station named after. T.I. Vyazemsky – natural reserve of the Russian Academy of Sciences. 2022. V. 7. No. 2 (22). P. 3–22 (in Russian). doi: 10.21072/eco.2022.22.01
9. Key to the fauna of the Black and Azov seas: in 3 volumes. V. 3. Kiev: Naukova Dumka, 1972. 340 p. (in Russian).
10. Greze I.I. Amphipods of the Black Sea and their biology. Kiev: Naukova Dumka, 1977. 156 p. (in Russian).
11. Chukhchin V.D. Gastropods ecology in the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka, 1984. 176 p. (in Russian).
12. Kiseleva M.I. Polychaetes (Polychaeta) of the Azov and Black seas. Apatity: Publishing house of the Kola Scientific Center RAS, 2004. 409 p. (in Russian).
13. World register of marine species [Internet recourse] <http://www.marinespecies.org/> (Accessed: 13.12.2023).
14. Maltsev V.I. Use of a functional abundance index for structural studies of zoocoenoses // Hydrobiological Journal. 1990. V. 26. No. 1. P. 87–89 (in Russian).
15. Whittaker R.H. Dominance and diversity in land-plant communities : numerical relations of species express the importance of competition in community function and evolution // Science. 1965. V. 147. No. 3655. P. 250–260. doi: 10.1126/science.147.3655.250
16. Makkaveeva E.B. Invertebrates of macrophyte thickets in the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka, 1979. 229 p. (in Russian).
17. Pesenko Yu.A. Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies. Moskva: Nauka, 1982. 288 p. (in Russian).
18. Kopyi V.G., Bondarenko L.V. Atlas of inhabitants of the pseudolittoral of the sea of Azov–Black sea coast of Crimea. Sevastopol: OOO Poligraficheskiy kompleks KIA, 2020. 120 p. (in Russian). doi: 10.21072/978-5-6044865-1-1
19. Viter T.V. Bottom communities in the berth area of the Gollandiya Bay and in the area of the state district power station (Sevastopolskaya Bay) // Ecological safety of the coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources. 2013. No. 27. P. 431–438 (in Russian).
20. Kolesnikova E.A., Boltacheva N.A., Makarov M.V. Macrozoobenthos of the inner part of Streletskaia Bay (Black Sea) // Scientific notes of the Ternopil National Pedagogical University. Series Biology. Special Iss. Hydroecology. 2005. V. 4. P. 287–289 (in Russian).
21. Makarov M.V., Viter T.V. Spatial-temporal changes in the macrozoobenthos of the Chernaya River mouth and the top of Sevastopol'skaya Bay (South-west Crimea) // Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2021. V. 7. No. 4. P. 92–107 (in Russian).
22. Kalugina-Gutnik A. A. Phytobenthos of the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka, 1975. 248 p. (in Russian).
23. Makkaveeva E.B. Epiphyton of *Ulva rigida* thickets // Sea ecology. 1992. V. 42. P. 20–24 (in Russian).
24. Makarov M.V., Kopyi 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) // Scientific notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry. 2020. V. 6. No. 3. P. 97–116 (in Russian). doi: 10.37279/2413-1725-2020-6-3-97-116
25. Giragosov V.E., Milchakova N.A., Karpova E.P., Kovardakov S.A., Bondareva L.V. Features of the biological diversity of the Kruglaya Bay and prospects for creating an ornithological reserve (southwestern Crimea, Black Sea) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 179–185 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-179-185
26. Shevchenko N.F. Species composition and quantitative distribution of fish in bays and the area of Sevastopol // Ichthyofauna of the Black Sea bays under anthropogenic impact. Kyiv: Naukova Dumka, 1993. P. 77–86 (in Russian).
27. Boltachev A.R., Karpova E.P. The ichthyofauna of the Sevastopol coastal zone (the Black Sea) // Marine Ecological Journal. 2012. V. 11. No. 2. P. 10–27 (in Russian).

**Тератоморфизм пыльцы *Pinus sylvestris* L.
в условиях промышленного загрязнения городской среды**

© 2026. Н. В. Василевская, д. б. н., профессор,
П. В. Осечинская, магистр,
Мурманский арктический университет,
183010, Россия, г. Мурманск, ул. Спортивная, д. 13,
e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

В статье представлены результаты анализа пыльцы сосны (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в условиях промышленного города Апатиты, расположенного за полярным кругом. Пробные площадки заложены в импактной зоне обогатительной фабрики АНОФ-2, где происходит переработка апатит-нефелиновых руд, и хвостохранилища. В результате палиноморфологического анализа пыльцы сосны выявлено 23 тератоморфы с различными аномалиями развития: без воздушных мешков, с их редукцией, одномешковые, разномешковые, с их асимметричным расположением и нарушением развития, с одним линзовидным или воротничковым воздушным мешком, карликовые (в том числе безмешковые, с их редукцией, одномешковые, с петлеобразно разросшейся экзиной), с разрывами экзины, редуцированным телом, гигантские с нормально развитыми воздушными мешками и их патологиями (одномешковые, безмешковые, разномешковые, с их редукцией, с воротничковым воздушным мешком и с нарушениями экзины), с крупными поперечными или продольными трещинами в центре тела пыльцевого зерна, полиады. Содержание пыльцы *P. sylvestris* с аномалиями развития в протестированных образцах очень высокое (80,4–90,4 %). Наиболее распространёнными тератоморфами являются пыльцевые зёрна нормальных, карликовых и гигантских размеров с патологиями воздушных мешков. Образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы *P. sylvestris* и особенности её тератологий свидетельствуют о высоком уровне загрязнения среды г. Апатиты. Пыльца сосны может использоваться как биомонитор для выявления фитотоксического и мутагенного действия поллютантов.

Ключевые слова: пыльца, тератогенез, *Pinus sylvestris*, промышленное загрязнение, Субарктика.

***Pinus sylvestris* L. pollen teratomorphism under conditions
of industrial pollution of the urban environment**

© 2026. N. V. Vasilevskaya ORCID: 0000-0002-6926-9353*
P. V. Osechinskaya ORCID: 0000-0002-4292-360X*
Murmansk Arctic University,
13, Sportivnaya St., Murmansk, Russia, 183010,
e-mail: n.v.vasilevskaya@gmail.com

The article presents the results of the palynological analysis of *Pinus sylvestris* L. growing in the Apatity industrial city, located above the Arctic Circle (Murmansk Region, Russia). Apatity is impacted by the Apatit JSC, which is one of the world leaders in the production of phosphate raw materials for mineral fertilizers. Four sample plots are laid in the impact zone of the apatite-nepheline processing plant (ANPP-2) and its tailing dump. At the end of June microstrobils with mature pollen (N = 35) are collected at each sample plot and fixed in a 40 % alcohol solution. For palynological analysis, the pollen was stained by Lugol's solution. The studies were carried out by light microscopy, with a 200 magnification. As a result of palynomorphological analysis of pine pollen samples, 23 teratomorphs with various developmental anomalies were identified: without sacchi, with their reduction, with a single saccus, with two dissimilar sacchi, with their asymmetric arrangement and developmental disorders, with one lenticular or collar saccus, dwarf (including without sacchi, with their reduction, with a single saccus, with a loop-like overgrown exine), with exine ruptures, with reduced body, giant with normally developed sacchi or with their pathologies (with a single saccus, without sacchi, with two dissimilar sacchi, with their reduction, with a collar saccus and with exine disorders), with large transverse or longitudinal cracks in the center of the pollen grain body, polyads. The teratomorphic pollen content in the tested samples is very high (80.4–90.4 %). The most common teratomorphs are pollen grains of normal, dwarf and giant sizes with anomalies in the development of sacchi. Such pollen loses not only its ability of long-range transport through air, but also its ability to pollinate and fertilize. From the adaptive evolution point of view, the bilaterally symmetrical sacchi of coniferous pollen, first of all are balancers on the ovule nucellus. Violation of their morphological structure does not allow them to

perform this function and limit reproduction. A large quantity of genetically abnormal *P. sylvestris* pollen forms and the peculiarities of its teratology indicate a high level of environmental pollution of the city of Apatity. Due to its sensitivity to pollutants *P. sylvestris* pollen can be used as a biomonitor to detect the phytotoxic and mutagenic effects of them.

Keywords: pollen, teratogenesis, *Pinus sylvestris*, industrial pollution, Subarctic.

Экологическая палинология – новое направление экологических исследований, активно развивающееся в последние десятилетия. Пыльцевой анализ обычно используется для палеогеографических и палеогеоэкологических реконструкций, сравнительно недавно этот метод стали применять для оценки качества окружающей среды (ОС) [1]. На урбанизированных территориях проводятся исследования с целью использования пыльцы в качестве биомониторов для улавливания тяжёлых металлов и других поллютантов [2], изучения её аномалий развития и жизнеспособности [3, 4], аллергенности [5], палиноиндикации ОС [1, 6]. Пыльца различных видов растений является биоиндикатором качества атмосферного воздуха в условиях повышенной транспортной нагрузки [7–9], импактных зон промышленных предприятий [10, 11]. Под воздействием промышленных эмиссий растения продуцируют большое количество тератоморфных и стерильных пыльцевых зёрен. При этом с ухудшением экологической обстановки увеличивается содержание патологической пыльцы [1, 6, 10]. Особую актуальность приобретают исследования в области экологической палинологии хвойных урбанизированных и промышленных территорий [6, 11–13]. В Российской Субарктике такие исследования немногочисленны [10, 14, 15]. В качестве тест-объекта для определения уровня загрязнения атмосферного воздуха часто используют *Pinus sylvestris* L., поскольку в условиях экологического стресса у неё отмечается увеличение тератоморфоза пыльцы [6, 10].

Цель работы – изучение тератоморфизма пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного загрязнения г. Апатиты.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является сосна обыкновенная, широко распространённая в городах Мурманской области. В г. Апатиты *P. sylvestris* в основном произрастает на окраинах города в составе еловых и сосновых лесов с примесью берёзы [16]. Пыльцевые зёрна *P. sylvestris* – двухмешковые, гетерополярные, билатерально-симметричные. Воздушные

мешки продолговато-эллиптической формы, резко отделены от пыльцевого зерна и смещены на дистальную сторону [1].

Исследования проведены в г. Апатиты, который расположен за Полярным кругом, в предгорьях Хибин (67°34'03" с. ш., 33°23'36" в. д.), в подзоне северо-таёжных лесов. Город находится в зоне промышленного воздействия комбината «Апатит», одного из лидеров среди мировых производителей фосфатного сырья для минеральных удобрений [17]. В состав горно-обогатительного комплекса входят рудники, обогатительные фабрики (АНОФ-2 и АНОФ-3), хвостохранилище и ряд цехов. В выбросах АО «Апатит» содержатся стронций, цинк, фосфор, кальций, натрий, калий, алюминий, азотные соединения и железо. Апатитовая пыль содержит некоторое количество естественных радионуклидов [17]. Отходы обогащения апатит-нефелиновых руд складываются в хвостохранилище, расположенном на берегу губы Белой озера Имандра, в 9 км от г. Апатиты [18]. Хвостохранилище АНОФ-2 принимает хвосты флотации апатит-нефелиновых руд и золу Апатитской ТЭЦ, их совместное хранение нарушает законодательную и традиционную практику горно-химических производств России [19]. Отходы обогащения состоят из фракции тонкодисперсных нефелиновых песков, которые при сильных ветрах переходят в аэрозольное состояние, формируя пылевые облака, и переносятся на дальние расстояния [20]. Атмосферный воздух г. Апатиты сильно загрязнён пылью, которая содержит токсичные соединения. Содержание стронция в 4 раза превышает фоновые значения, меди – в 2 раза, фосфатов – в 10 раз, сульфатов и фторидов – в 3 раза [21].

В мае 2020 г. в окрестностях г. Апатиты заложено четыре пробные площадки: ПП₁ – «Хвостохранилище», представляет собой лесной ценоз в 2 км от центра хвостохранилища АНОФ-2 в юго-восточном направлении; ПП₂ – «АНОФ-2», лесной ценоз в 1 км от обогатительной фабрики АНОФ-2 в юго-восточном направлении; ПП₃ – «ул. Козлова», лесопарковая зона на северной окраине г. Апатиты, в 3,8 км от центра АНОФ-2 и 35 м от железной дороги; ПП₄ – «Любкино болото», лесопарк

в юго-восточной части г. Апатиты, в 5,7 км от центра фабрики АНОФ-2. «Любкино болото» – уникальный природный объект, на территории которого произрастает 11 видов орхидей, включённых в Красную книгу Мурманской области и Красную книгу Восточной Фенноскандии [22]. Контрольная площадка заложена в пос. Верхнетуломский, в 130 км от г. Апатиты. На территории и в окрестностях посёлка отсутствуют экологически опасные промышленные объекты.

В конце июня, в период массового пыления сосны, на каждой пробной площадке с 5 деревьев *P. sylvestris* собрано по 7 микростробил с созревшей пылью (N = 35). Мужские шишки подсушивали и фиксировали в 40 % растворе спирта. Собранный материал хранился в холодильнике при температуре 0–4 °С. Для пыльцевого анализа использовали микроспорофиллы из средней части микростробил, пыльцу окрашивали раствором Люголя. Исследования проводили методом световой микроскопии, с увеличением в 200 раз. Палинологический анализ выполнялся по микрофотографиям, выполненным через окуляр микроскопа 13-мегапиксельной камерой Xiaomi Redmi Note 5A Prime. На основе микросъёмки препаратов в каждой пробе описывалось по 550 пыльцевых зёрен. Тератоморфы выделяли на основе аномалий

развития пыльцы *P. sylvestris* согласно работе [1], определяли количество и процентное содержание нормальной и тератоморфной пыльцы в пробах.

Результаты и обсуждение

В результате палиноморфологических исследований определено, что наибольшее количество нормальной, морфологически неизменённой пыльцы *P. sylvestris* содержится в образцах контроля (рис. 1). В г. Апатиты и его окрестностях доля типичной пыльцы очень низкая и варьирует от 9,6 % (ПП₂) до 19,6 % (ПП₁). Во всех пробах выявлены пыльцевые зёрна сосны, не соответствующие по своим морфологическим характеристикам общепринятой норме. Нетипичные (тератоморфные) пыльцевые зёрна отличаются от нормальных формой, размерами, наличием аномалий развития.

В протестированных пробах из г. Апатиты выделено 23 тератоморфы пыльцы *P. sylvestris* (рис. 2), их содержание очень велико (80,4–90,4 %) (рис. 1). Больше всего аномальной пыльцы в пробе ПП₂ (90,36%). Однако самый высокий уровень полиморфизма пыльцы отмечен в образцах ПП₁ – 23 тератоморфы. В пос. Верхнетуломский (контроль), расположенном на большом удалении от г. Апатиты и других промышленных центров Мурман-

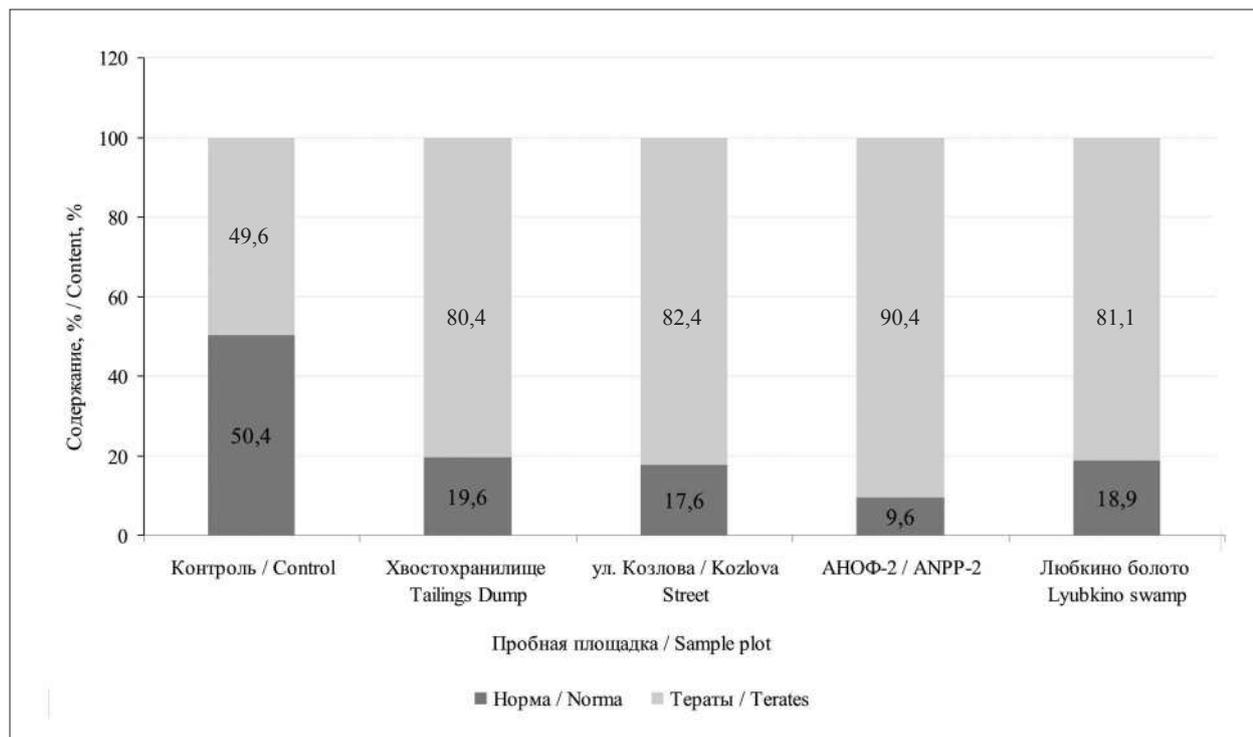


Рис. 1. Соотношение нормальной и тератоморфной пыльцы *Pinus sylvestris*, %.
 Fig. 1. The ratio of *Pinus sylvestris* normal and teratomorphic pollen, %.

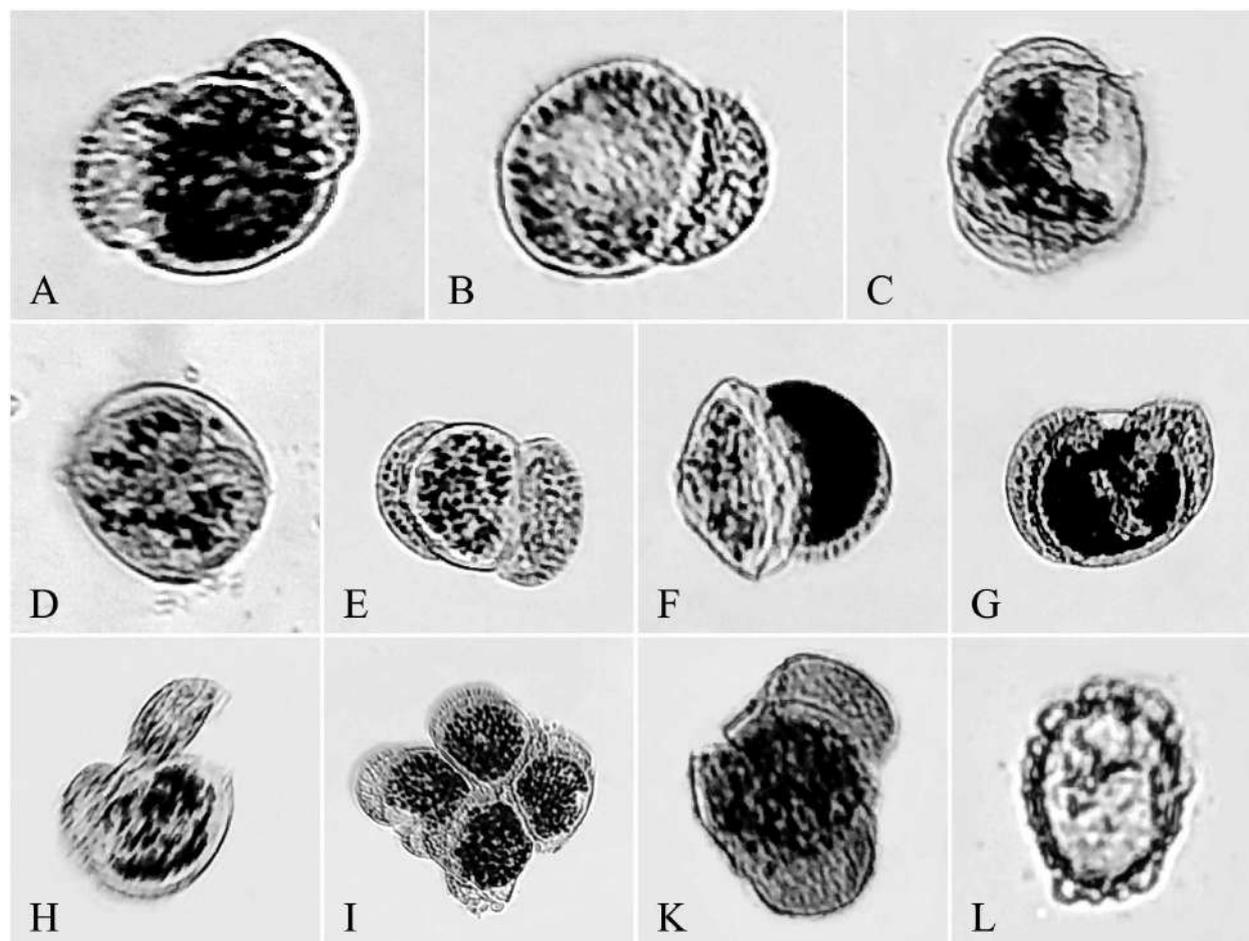


Рис. 2. Тератоморфы пыльцы *P. sylvestris*: А – нормальное, В – одномешковое, С – с редукцией воздушных мешков, D – без воздушных мешков, E – двухразномешковое, F – с линзовидным воздушным мешком, G – с воротничковым воздушным мешком, H – с нарушениями воздушных мешков, I – полиада, K – с трещиной в экзине, L – карликовое с петлеобразными наростами на экзине
Fig. 2. Teratomorphs of *P. sylvestris* pollen: A – normal, B – with a single saccus, C – with reduced sacci, D – without sacci, E – with two dissimilar sacci, F – with one lenticular saccus, G – with collar-like saccus, H – with disorders of saccus, I – polyads, K – with crack in exine, L – dwarf with loop-like growths on the exine

ской области, выделено 16 тератоморф. Это свидетельствует об очень высокой чувствительности *P. sylvestris* к загрязнению среды и дальнем атмосферном переносе аэрозолей от предприятий.

Наиболее часто встречается пыльца нормальных размеров с патологиями развития воздушных мешков: с их редукцией, безмешковая, одномешковая, разномешковая, с асимметричным расположением, нарушениями развития, со сросшимися воздушными мешками (линзовидным и воротничковым) (рис. 2). Высокая суммарная доля пыльцы с такими патологиями выявлена в пробах ПП₄ (59,6 %), ПП₂ (53 %), ПП₃ (52 %), что является индикатором воздействия пылевых выбросов комбината «Апатит». По данным экологического мониторинга, проведённого учёными МГУ

им. М. В. Ломоносова, г. Апатиты и, особенно его северо-восточные и восточные районы, находятся под влиянием деятельности АНОФ-2 и пыления хвостохранилища [21]. Самой распространённой тератоморфой *P. sylvestris* является редукция пыльцевых мешков (рис. 2С, рис. 3). Такая аномалия развития считается наиболее характерной для мужского гаметофита сосны. В образцах выявлено много безмешковой пыльцы (рис. 2D), особенно на ПП₃ (рис. 3). Содержание одномешковых пыльцевых зёрен (рис. 2В) значительно ниже (рис. 3). Реже встречаются разномешковые (0,55–3,82 %) (рис. 2E), с их асимметричным расположением (1,82–4,0 %), с линзовидным (0,73–1,45 %) (рис. 2F) воздушным мешком. Во всех образцах, кроме контроля, выявлена пыльца с воротничковым сплошным полусфе-

рическим мешком (0,55–3,27 %) (рис. 2G); на ПП₂ и ПП₄ её содержание максимально. Такая тератоморфа встречается у сосны только в условиях очень сильного загрязнения среды [11].

В образцах пыльцы *P. sylvestris* из г. Апатиты часто встречаются гигантские экземпляры, в 1,5 раза больше типичных, предположительно диплоидные, в том числе с аномалиями развития воздушных мешков и экзины (одномешковая, безмешковая, разномешковая, с их редукцией, с воротничковым воздушным мешком, с нарушениями экзины). Наибольшее суммарное содержание гигантской пыльцы с различными патологиями выявлено в образцах ПП₁, ПП₂, ПП₃ (рис. 4). Появление гигантской пыльцы связано с нарушениями мейоза под воздействием мутагенов различной природы. В пробах выявлено много карликовой пыльцы *P. sylvestris*, в том числе с аномалиями развития воздушных мешков (с их редукцией, одномешковые, безмешковые), её суммарное содержание максимально в пробах ПП₁, ПП₂, ПП₃ (рис. 4). Особенно высока доля карликовых безмешковых пыльцевых зёрен (7,3–13,1 %), в большинстве слу-

чаев они стерильны. В образцах с площадок ПП₁, ПП₂ и ПП₄ обнаружена безмешковая нанопыльца с петлеобразным разрастанием экзины (0,4–1,6 %) (рис. 2L), она также стерильна. Особенностью патоморфоза пыльцы *P. sylvestris* в зоне промышленного воздействия АО «Апатит» являются пыльцевые зёрна с крупными поперечными или продольными трещинами (открытыми или закрытыми) в центре тела, их максимальное содержание выявлено в пробах ПП₁ и ПП₂, в контроле они отсутствуют (рис. 2K, рис. 4).

В палинотератном комплексе *P. sylvestris* г. Апатиты встречаются пыльцевые зёрна с нарушениями экзины (1,1–5,1 %), с редуцированным телом (0,4–1,1 %). В образцах площадок ПП₁ и ПП₃ выявлены полиады (0,2–0,4 %) (рис. 2I).

Исследования показали, что в палинотератном комплексе *P. sylvestris* г. Апатиты и его окрестностей высоко содержание тератоморф пыльцы нормальных, карликовых и гигантских размеров с аномалиями развития воздушных мешков. Известно, что размеры пыльцевых зёрен являются стабильным видовым признаком и характеризуются очень низ-

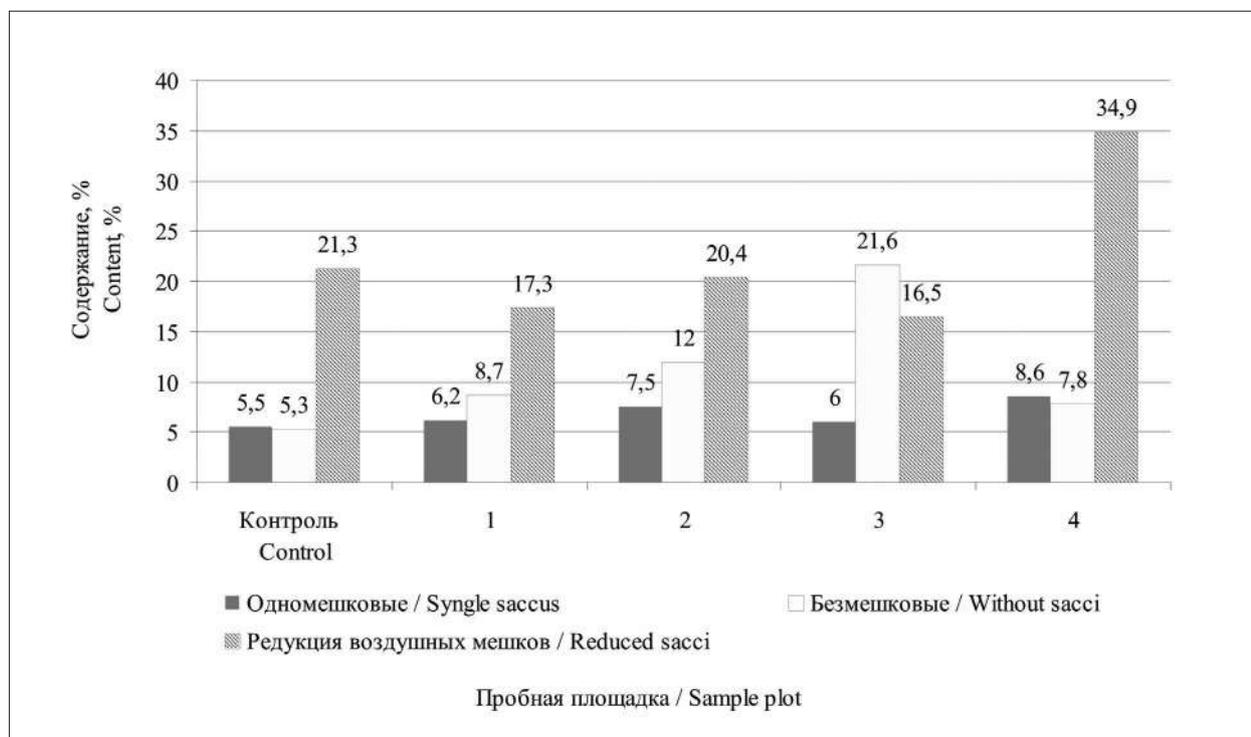


Рис. 3. Соотношение пыльцы *P. sylvestris* с различными патологиями воздушных мешков (%).

Примечание: здесь и на рис. 4 размещение пробных площадок см. в тексте

Fig. 3. The ratio of *P. sylvestris* pollen with different pathologies in the sacci (%).

Note: here and in Fig. 4: control plot – in the village Verkhnetulomsky, in 130 km from Apatity; sample plots: 1 – forest cenosis in 2 km to south-east from the apatite-nepheline processing plant (ANPP-2) tailing dump; 2 – forest cenosis in 1 km to south-east from the ANPP-2; 3 – forest park area in the northern Apatity, in 3.8 km from the ANPP-2 and 35 m from the railway; 4 – Lyubkino swamp – forest park to the southeast of Apatity, in 5.7 km from the ANPP-2

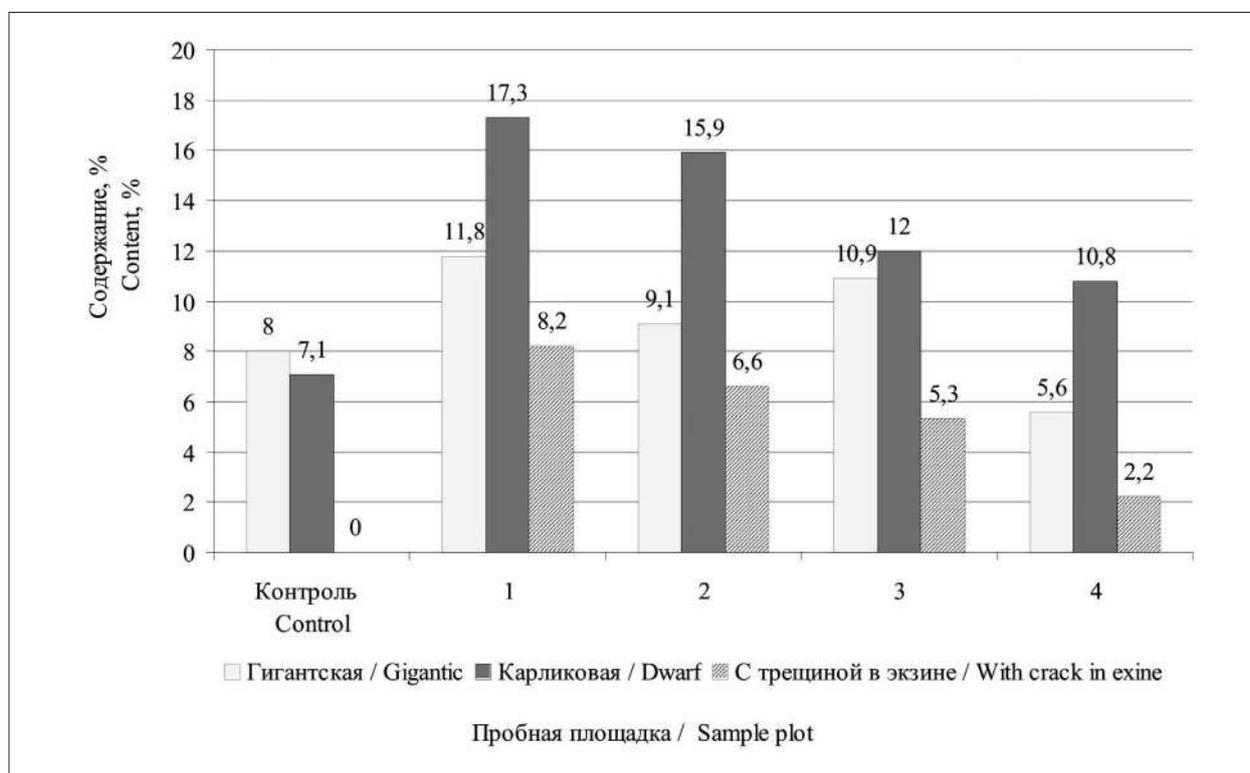


Рис. 4. Соотношение карликовой и гигантской пыльцы *P. sylvestris* (в том числе с нарушениями воздушных мешков) и с трещиной в центре тела (%)
Fig. 4. The ratio of dwarf and giant *P. sylvestris* pollen (including those with violations of the sacci) and with a crack in the center of the body (%)

кой индивидуальной, внутривидовой географической изменчивостью [23]. Размеры пыльцы незначительно варьируют в природных популяциях, в отличие от импактных зон. В работе [24] отмечено, что при геоботанических стрессах общей тенденцией тератоморфоза является нанизм пыльцевых зёрен. На образование мелкой пыльцы вследствие сухости воздуха в условиях промышленного загрязнения указывают многие авторы [1, 11]. В то же время показано [25], что карликовая пыльца образуется при нарушениях мейоза, утрачивая часть генетического материала в результате повреждения веретена деления или хромосомных мутаций. Высокое содержание в пробах из г. Апатиты гигантских пыльцевых зёрен *P. sylvestris* с различными нарушениями развития воздушных мешков также является следствием мутагенеза и нарушения процесса мейоза. Такая пыльца, с огромным телом и карликовыми мешками, и наоборот, описана при исследовании природных геоботанических катастроф [24]. Пыльца *P. sylvestris* с патологиями развития пыльцевых мешков утрачивает не только возможность дальнего переноса по воздуху, но и способность к опылению. С точки зрения адаптивной эволюции, билатерально-симметричные воз-

душные мешки пыльцы хвойных выполняют роль балансиров на нуцеллусе семязпочки [26]. Нарушение их морфоструктуры не позволяет им выполнять эту функцию и, таким образом ограничивает репродукцию. Особенностью патоморфоза *P. sylvestris* в зоне промышленного воздействия концерна «Апатит» является частая встречаемость пыльцы с крупными поперечными или продольными трещинами в центре тела, а также карликовые пыльцевые зёрна с петлеобразным разрастанием экзины. Аналогичные тератоморфы были выявлены около атомной станции в г. Соновый Бор Ленинградской области [27], они рассматриваются как индикаторы присутствия радионуклидов и высокого уровня загрязнения среды.

Уровень тератоморфоза пыльцы сосны в г. Апатиты превышает аналогичные показатели в промышленных городах Севера России, где проводились аналогичные исследования [6, 10, 11, 15]. В г. Мончегорске – центре цветной металлургии Мурманской области, доля тератоморфной пыльцы *P. sylvestris* варьировала в образцах из разных районов города от 10 до 55 % [10], в Мурманске от 54,2 до 70,6 % [15]. В г. Костомукше (Республика Карелия), расположенном в импактной зоне комбина-

та «Карельский окатыш», доля аномальной пыльцы сосны в среднем составила 43 % [6].

Заключение

Палиноморфологические исследования *P. sylvestris* впервые проведены в г. Апатиты, в импактной зоне фабрики АНОФ-2 по обогащению апатит-нефелиновых руд и хвостохранилища, где складываются отходы их переработки. На всех пробных площадках выявлен высокий уровень тератогенеза пыльцы (80,4–90,4 %), в то время как содержание аномальных пыльцевых зёрен сосны в популяциях северных лесных экосистем не превышает 3–7 %. Аномалии в развитии пыльцы *P. sylvestris* в г. Апатиты свидетельствуют о том, что пыльники микростробил подвергаются воздействию токсичных пылевых выбросов АНОФ-2 и хвостохранилища, что приводит к нарушениям микрогаметогенеза и исключает возможность участия пыльцы в процессах опыления и оплодотворения. У пыльцы сосны происходят генетические нарушения процессов морфогенеза, наиболее распространёнными аномалиями развития являются: редукция воздушных мешков, их отсутствие, срастание с образованием линзовидного или воротничкового мешка, одномешковость, а также гигантская и карликовая пыльца с различными тератологиями воздушных мешков. Образование большого количества генетически аномальных форм пыльцы сосны и особенности её тератологий свидетельствуют о высоком уровне загрязнения среды г. Апатиты. Полученные результаты подтверждают данные экологического мониторинга, проведённого учёными МГУ им. М. В. Ломоносова, и свидетельствуют о высоком уровне загрязнения атмосферного воздуха города токсичными соединениями. Исследования показали, что пыльца *P. sylvestris* может использоваться как биоиндикатор для выявления фитотоксического и мутагенного действия поллютантов, что согласуется с результатами эколого-палинологического анализа пыльцы сосны, проведённого в некоторых промышленных центрах России. Это обусловлено высокой чувствительностью пыльцы к действию загрязнителей и тем, что именно в гаплоидном состоянии проявляются летальные мутации. Для того, чтобы выявить причины тератоморфизма пыльцы *P. sylvestris* под воздействием промышленных выбросов комбината «Апатит» и уточнить экологические причины генетических воздействий, необходим долгосрочный мониторинг.

Литература

1. Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. СПб.: Недра, 2006. 197 с.
2. Kalbande D.M., Dhadse S.N., Chaudhari P.R., Wate S.R. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment // Environ. Monit. Assess. 2008. V. 138. P. 233–238. doi: 10.1007/s10661-007-9793-0
3. Comtois P., Schemenauer R.S. Tree pollen viability in areas subject to high pollutant deposition // Aerobiologia. 1991. V. 7. P. 144–151. doi: 10.1007/BF02270683
4. Gottardini E., Cristofolini F., Paoletti E., Lazzeri P., Pepponi G. Pollen viability for air pollution biomonitoring // J. Atmos. Chem. 2004. V. 49. P. 149–159. doi: 10.1007/s10874-004-1221-z
5. Namork E., Johansen B.V., Løvik M. Detection of allergens adsorbed to ambient air particles collected in four European cities // Toxicol. Lett. 2006. V. 165. No. 1. P. 71–78. doi: 10.1016/j.toxlet.2006.01.016
6. Ерохина И.С., Елькина Н.А., Марковская Е.Ф. Палиноиндикация природной среды г. Костомукши // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2011. № 6. С. 20–23.
7. Cerceau-Larrival M.Th., Bocquel C., Carbonnier-Jarreau M.C., Verhille A.M. Pollen: bio-indicator of pollution // J. Aerosol Sci. 1996. V. 27. Suppl. 1. P. S227–S228. doi: 10.1016/0021-8502(96)00186-3
8. Calzoni G.L., Antognoni F., Pari E., Fonti P., Gnes A., Speranza A. Active biomonitoring of heavy metal pollution using *Rosa rugosa* plants // Environ. Pollut. 2007. V. 149. No. 2. P. 239–245. doi: 10.1016/j.envpol.2006.12.023
9. Faur A., Șteflea F., Ciuciu A.E. Study on pollen viability as bioindicator of air quality // Annals of West University of Timișoara. Biology. 2012. V. 15. No. 2. P. 137–140.
10. Василевская Н.В., Петрова Н.В. Морфологическая изменчивость пыльцы *Pinus sylvestris* L. в условиях промышленного города (на примере г. Мончегорска) // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 4. С. 7–11.
11. Третьякова И.Н., Носкова Н.Е. Пыльца сосны обыкновенной в условиях экологического стресса // Экология. 2004. № 1. С. 26–34.
12. Калашник Н.А., Ясовиева С.М., Преснухина Л.П. Аномалии пыльцы хвойных видов деревьев при промышленном загрязнении на Южном Урале // Лесоведение. 2008. № 2. С. 33–40.
13. Sheng X., Zhang S., Jiang L., Li K., Gao Y., Li X. Lead stress disrupts the cytoskeleton organization and cell wall construction during *Picea wilsonii* pollen germination and tube growth // Biol. Trace Elem. Res. 2012. V. 146. No. 1. P. 86–93. doi: 10.1007/s12011-011-9212-9
14. Vasilevskaya N.V., Domakhina A.D. Teratomorphism of pollen of *Larix sibirica* Ledeb. (*Pinaceae* Lindl.)

in the Arctic urbanized territory // Czech Polar Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 24–36. doi: 10.5817/CPR2018-1-2

15. Vasilevskaya N.V., Petrova N.V., Domakhina A.D. Palynoidication of the environment of industrial cities in the Far North // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 839. Article No. 052020. doi: 10.1088/1755-1315/839/5/052020

16. Мингалёва Т.А., Горячев А.А., Мингалёва Е.И., Мингалёв А.И. Социальные и экологические функции общественных парков малого города в условиях Севера (на примере города Апатиты Мурманской области) // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11. № 8. С. 179–195. doi: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.019

17. Карначёв И.П., Жиров В.К., Загвоздина О.И., Крымская М.М. Эколого-гигиеническая оценка состояния окружающей среды в районе размещения Хибинского горно-химического комплекса Мурманской области // Вестник МГТУ. 2011. Т. 14. № 3. С. 552–560.

18. Терещенко С.В., Марчевская В.В., Павлишина Д.Н. Пути снижения негативного воздействия горного производства на окружающую природную среду // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. Т. 4. С. 62–66.

19. Приймак Т.И., Зосин А.П., Маслобоев В.А. Экологические аспекты гипергенеза минерального сырья в условиях субарктики. Апатиты: Кольский науч. центр РАН, 2013. 108 с.

20. Тимофеева Ю.Р., Степанова Е.А., Богданов В.Л. Биологическая рекультивация нарушенных земель горно-промышленным комплексом (на примере ОАО «Апатит») // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2016. № 42. С. 294–299.

21. Воробьевская Е.Л., Седова Н.Б., Слипенчук М.В., Цымбал М.Н. Геоэкологические исследования снега и поверхностных вод в зимний период в центральной части Кольского полуострова // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 64–70. doi: 10.25750/1995-4304-2020-1-064-070

22. Блинова И.В. Численность популяций орхидных и их динамика на северном пределе распространения в Европе // Ботанический журнал. 2009. Т. 94. № 2. С. 212–240.

23. Козубов Г.М. Биология плодоношения хвойных на Севере. Л.: Наука, 1974. 134 с.

24. Левковская Г.М. Зональные особенности современной растительности и рецентных спорово-пыльцевых спектров Западной Сибири // Методические вопросы палинологии: труды III Междунар. палинол. конф. М.: Наука, 1973. С. 116–120.

25. Бессонова В.П. Состояние пыльцы как показатель загрязнения среды тяжёлыми металлами // Экология. 1992. № 4. С. 45–50.

26. Токарев П.И. Морфология и ультраструктура пыльцевых зёрен. М.: Изд-во КМК, 2002. 51 с.

27. Дзюба О.Ф., Борейша И.К., Яковлева Т.П., Шейнерман Н.А., Надпорожская М.А. Качество пыльцы высших растений и некоторых клеточных структур животных организмов в условиях промышленной площадки ЛАЭС и города Сосновый Бор // Пыльца как индикатор состояния окружающей среды и палеоэкологические реконструкции. СПб: ВНИГРИ, 2001. С. 69–78.

References

1. Dzyuba O.F. Palynoidication of the environment quality. Sankt-Peterburg: Nedra, 2006. 197 p. (in Russian).

2. Kalbande D.M., Dhadse S.N., Chaudhari P.R., Wate S.R. Biomonitoring of heavy metals by pollen in urban environment // Environ. Monit. Assess. 2008. V. 138. P. 233–238. doi: 10.1007/s10661-007-9793-0

3. Comtois P., Schemenauer R.S. Tree pollen viability in areas subject to high pollutant deposition // Aerobiologia. 1991. V. 7. P. 144–151. doi: 10.1007/BF02270683

4. Gottardini E., Cristofolini F., Paoletti E., Lazzeri P., Peponi G. Pollen viability for air pollution biomonitoring // J. Atmos. Chem. 2004. V. 49. P. 149–159. doi: 10.1007/s10874-004-1221-z

5. Namork E., Johansen B.V., Løvik M. Detection of allergens adsorbed to ambient air particles collected in four European cities // Toxicol. Lett. 2006. V. 165. No. 1. P. 71–78. doi: 10.1016/j.toxlet.2006.01.016

6. Erokhina I.S., Elkina N.A., Markovskaya E.F. Palynoidication of the Kostomuksha environment // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2011. No. 6. P. 20–23 (in Russian).

7. Cerceau-Larrival M.Th., Bocquel C., Carbonnier-Jarreau M.C., Verhille A.M. Pollen: bio-indicator of pollution // J. Aerosol Sci. 1996. V. 27. Suppl. 1. P. S227–S228. doi: 10.1016/0021-8502(96)00186-3

8. Calzoni G.L., Antognoni F., Pari E., Fonti P., Gnes A., Speranza A.N. Active biomonitoring of heavy metal pollution using *Rosa rugosa* plants // Environ. Pollut. 2007. V. 149. No. 2. P. 239–245. doi: 10.1016/j.envpol.2006.12.023

9. Faur A., Șteflea F., Ciuciu A.E. Study on pollen viability as bioindicator of air quality // Annals of West University of Timișoara. Biology. 2012. V. 15. No. 2. P. 137–140.

10. Vasilevskaya N.V., Petrova N.V. Morphological variability of pollen of *Pinus sylvestris* L. in the conditions of industrial town (Russia, Monchegorsk) // Proceedings of Petrozavodsk State University. 2014. No. 4. P. 7–11 (in Russian).

11. Tretyakova I.N., Noskova N.E. Scots pine pollen under environmental stress // Ecology. 2004. No. 1. P. 26–34 (in Russian).

12. Kalashnik N.A., Yasovieva S.M., Presnukhina L.P. Pollen anomalies of coniferous tree species under the industrial pollution in the Southern Urals // Lesovedenie. 2008. No. 2. P. 33–40 (in Russian).

13. Sheng X., Zhang S., Jiang L., Li K., Gao Y., Li X. Lead stress disrupts the cytoskeleton organization and cell wall construction during *Picea wilsonii* pollen germination and tube growth // Biol. Trace Elem. Res. 2012. V. 146. No. 1. P. 86–93. doi: 10.1007/s12011-011-9212-9
14. Vasilevskaya N.V., Domakhina A.D. Teratomorphism of pollen of *Larix sibirica* Ledeb. (*Pinaceae* Lindl.) in the Arctic urbanized territory // Czech Polar Reports. 2018. V. 8. No. 1. P. 24–36. doi: 10.5817/CPR2018-1-2
15. Vasilevskaya N.V., Petrova N.V., Domakhina A.D. Palynoidication of the environment of industrial cities in the Far North // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 839. Article No. 052020. doi: 10.1088/1755-1315/839/5/052020
16. Mingaleva T.A., Goryachev A.A., Mingaleva E.I., Mingalev A.I. Social and environmental functions of public parks of a small northern town (on the example of the Apatity town in the Murmansk region) // Herald of the Kola Science Centre of the RAS. 2020. V. 11. No. 8. P. 179–195 (in Russian). doi: 10.37614/2307-5252.2020.2.8.019
17. Karnachev I.P., Zhiron V.K., Zagvozdina O.I., Krymskaya M.M. Ecological and hygienic assessment of the state of the environment in the area of the Khibiny mining and chemical complex of the Murmansk region // Vestnik of MSTU. 2011. V. 14. No. 3. P. 552–560 (in Russian).
18. Tereshchenko S.V., Marchevskaya V.V., Pavlishina D.N. Ways to reduce negative environmental impact of mining industry // Herald of the Kola Science Center of RAS. 2016. V. 4. P. 62–66 (in Russian).
19. Priymak T.I., Zosin A.P., Masloboev V.A. Ecological aspects of hypergenesis of mineral raw materials in the subarctic region conditions. Apatity: Kola Science Center RAS, 2013. 108 p. (in Russian).
20. Timofeeva Yu.R., Stepanova E.A. Bogdanov V.L. Biological reclamation of disturbed land on the industrial complex (for the example OJSC “Apatite”) // Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2016. No. 42. P. 294–299 (in Russian).
21. Vorobyevskaya E.L., Sedova N.B., Slipenchuk M.V., Cymbal M.N. Environmental situation in the central part of the Kola Peninsula // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 1. P. 64–70 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-064-070
22. Blinova I.V. Number of individuals and dynamics of orchid populations at the northern limit of their distribution in Europe // Botanicheskii Zhurnal. 2009. V. 94. No. 2. P. 212–240 (in Russian).
23. Kozubov G.M. Biology of coniferous fruiting in the North. Leningrad: Nauka, 1974. 134 p. (in Russian).
24. Levkovskaya G.M. Zonal features of modern vegetation and rescent spore-pollen spectra in Western Siberia // Methodical issues of palynology: trudy III Mezhdunarodnoy palinologicheskoy konferentsii. Moskva: Nauka, 1973. P. 116–120 (in Russian).
25. Bessonova V.P. Pollen state as an index of environmental pollution with heavy metals // Ekologiya. 1992. No. 4. P. 45–50 (in Russian).
26. Tokarev P.I. Morphology and ultrastructure of pollen. Moskva: KMK Publishing House, 2002. 51 p. (in Russian).
27. Dziuba O.F., Boreisha I.K., Yakovleva T.P., Sheynerman N.A., Nadporozhskaya M.A. The quality of higher plants pollen and some cellular structures of animals in the industrial site of the Leningrad Nuclear Power Plant and in Sosnovyy Bor city // Pollen as an indicator of environmental state and paleoecological reconstructions. Sankt-Peterburg: VNIGRI, 2001. P. 69–78 (in Russian).

Seasonal changes in chlorophyll fluorescence to assess the stress tolerance of Siberian pines at treeline

© 2026. N. V. Pakharkova¹ ORCID: 0000-0003-0377-3263, I. G. Gette¹ ORCID: 0000-0001-7372-1499,
 N. A. Gaevsky¹ ORCID: 0000-0002-3747-9858, E. G. Rudikovskaya² ORCID: 0000-0001-5709-2370,
 A. V. Rudikovskii² ORCID: 0000-0001-8567-0318, I. V. Masentsova¹ ORCID: 0009-0000-4038-6583,
 A. A. Kalabina¹ ORCID: 0009-0000-3563-2460, V. L. Gavrikov¹ ORCID: 0000-0002-7816-0536

¹Siberian Federal University,

79, Svobodny St., Krasnoyarsk, Russia, 660041,

²Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry
 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

132, Lermontov St., Irkutsk, Russia, 664033,

e-mail: nina.pakharkova@yandex.ru

Due to climate change, the boundaries of the ranges of many plants are shifting both in latitudinal and altitudinal directions. In particular, the forest boundary shifts upward in the mountains. A transect with four sampling plots was laid on the slope of the Ergaki Ridge (Western Sayan), crossing the treeline (upper border) of the forest as it transits from the mountain taiga to the rocky-tundra belt. It has been revealed that Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) plants use various survival strategies when spreading above the treeline, which manifests itself in a change in the shape of the crown form from stem-like to krummholz, as well as seasonal changes in the pigment complex and parameters of chlorophyll fluorescence in needles. In all habitats of *P. sibirica*, an important parameter for predicting an increase in the needle weight, which, in turn, ensures the productivity of the entire plant, is the maximum rate of non-cyclic electron transfer in the summer. In spring and autumn (in the course of transition from winter dormancy to vegetation and back), the ratio of chlorophylls and carotenoids from forest to mountain-tundra communities decreases in the pigment complex of needles. Siberian pine specimens growing above the treeline and having mechanisms for dissipating excess light energy by light-induced non-photochemical fluorescence quenching have a clear advantage in gaining needle weight over other plants from the same sample plots. For trees from sample plots located in forest environment, a high proportion of non-photochemical fluorescence quenching is rather a disadvantage. The considered parameters of chlorophyll fluorescence can be used to identify *P. sibirica* individuals resistant to habitat conditions above the treeline and their subsequent use in breeding to increase the area of woodlands under climate change.

Keywords: *Pinus sibirica*, treeline, fluorescence, chlorophyll, carotenoids.

УДК 574.24

Сезонные изменения флуоресценции хлорофилла для оценки стрессоустойчивости сосны сибирской на верхнем пределе распространения

© 2026. Н. В. Пахарькова¹, к. б. н., доцент, И. Г. Гетте¹, к. б. н., ст. преподаватель,
 Н. А. Гаевский¹, д. б. н., профессор, Е. Г. Рудиковская², к. б. н., с. н. с.,
 А. В. Рудиковский², д. с.-х. н., г. н. с., И. В. Масенцова¹, аспирант,
 А. А. Калабина¹, магистрант, В. Л. Гавриков¹, д. б. н., профессор,

¹Сибирский федеральный университет,

660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79,

²Сибирский институт физиологии и биохимии растений,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 132,

e-mail: nina.pakharkova@yandex.ru

Из-за изменения климата границы ареалов многих растений смещаются как в широтном, так и в высотном направлениях, в частности, граница лесов в горах смещается вверх. На склоне хребта Ергаки (Западный Саян) была заложена трансекта с четырьмя пробными площадями, пересекающая верхнюю границу леса при переходе от горно-таёжного к гольцово-тундровому поясу. Выявлено, что растения сосны сибирской (*Pinus sibirica* Du

Tour) используют различные стратегии выживания при распространении выше границы леса, что проявляется в изменении формы кроны со стволовой на стланниковую, а также в сезонных изменениях пигментного комплекса и параметров флуоресценции хлорофилла хвои. Во всех местообитаниях *P. sibirica* важным параметром для прогнозирования увеличения массы хвои, которое, в свою очередь, обеспечивает продуктивность всего растения, является максимальная скорость нециклического переноса электронов в летнее время. Весной и осенью (при переходе от состояния зимнего покоя к вегетации и обратно) в пигментном комплексе хвои уменьшается соотношение хлорофиллов и каротиноидов от лесных к горно-тундровым фитоценозам. Экземпляры сосны сибирской, растущие выше границы леса и имеющие механизмы рассеивания избыточной световой энергии путём светоиндуцированного нефотохимического тушения, имеют явное преимущество в наборе массы хвои перед другими растениями с тех же пробных площадей. Для деревьев с пробных площадей, расположенных в лесных фитоценозах, высокая доля нефотохимического тушения является скорее помехой. Рассмотренные параметры флуоресценции хлорофилла могут быть использованы для выявления особей *P. sibirica*, устойчивых к условиям обитания выше границы леса, и их последующего использования в селекции для увеличения площади лесных массивов в условиях изменения климата.

Ключевые слова: *Pinus sibirica*, верхняя граница леса, флуоресценция, хлорофилл, каротиноиды.

Climate change exerts a substantial impact on forest ecosystems' functioning. The geographic ranges of many boreal forest conifers experience shifts, in both latitudinal and altitudinal directions [1–4]. Such a tendency – a higher temperature stimulates the altitudinal shift of forest distribution range – has been reported for a number of geographical areas, like Kola peninsula, polar Ural Mountains, Putorana plateau [5, 6], as well as in East Sayan [7], West Sayan [8], and Kuznetsk Alatau [9].

Whether the seedlings and saplings of a mountain forest dominant species are able to survive above the treeline is a crucial point shaping up the species composition of such forests. For Siberian pine/fir forests, a species playing the pioneering role is Siberian pine (*Pinus sibirica* Du Tour) [10]. A great advantage of Siberian pine is its symbiotic distributor species, nutcracker (*Nucifraga caryocatactes* L.), that collects the pine seeds and hides them in the litter and under the mosses cover. However, the survival of the pine seedlings above the treeline is minor. The seedlings to saplings and adult trees to saplings ratios are much lower above the treeline than under the canopies of closed forests [11]. Above the treeline, krummholz Siberian pine forms with multiple small stems have been mostly found because of the harsh environment with strong winds and shallow snow cover [12].

Nevertheless, a question is open of defining ecological and physiological traits that distinguish those tree specimens that cope to survive and develop under the harsh conditions of mountain environment. Under the altitudinal zonation, the mechanisms should be described that allow the seedlings and saplings of Siberian pine to adapt to multiple stress factors.

To find the most adapted individuals, the methods of plant phenomics are fairly suitable that are based on physiological and biochemical traits of a plant organism at the level of the phe-

notype [13, 14]. Some authors [15–19] believe that the methods based on chlorophyll fluorescence are a perspective for plant phenotyping.

We hypothesized that chlorophyll fluorescence and pigment content in needles are likely tightly connected to the environmental stress induced by altitude, especially in trees growing above the treeline. The goal of this study was to test seasonal alterations of chlorophyll fluorescence and pigment composition as a tool for phenotyping of *Pinus sibirica* saplings and trees in terms of their stress-tolerance against the adverse environmental factors along an altitudinal gradient of West Sayan (Eastern Siberia).

Materials and methods of research

An altitudinal transect has been set up in the vicinity of Oyskoe Lake within the Yergaki National Park (West Sayan mountains) located in Ermakovskiy Region of Krasnoyarsk Krai. The transect crossed the treeline where taiga belt changes over to rocky-tundra belt (Fig. 1).

The climate of the area was estimated with the help the meteorological station Olen'ya Rechka (WMO 29974, N 52°48', E 93°14'; 1404 m a.s.l.) in 5 km from the lake. The mean temperature in January is –17.7 °C, in July is +13.2 °C. Precipitation totals up to 1200 mm, with an average of 440 mm precipitation during the summer months.

An altitudinal transect has been set up in the vicinity of Oyskoe Lake within the Yergaki National Park (West Sayan mountains) in Ermakovskiy Region of Krasnoyarsk Krai. The transect consisted of four sample plots (SP):

SP1 (N 52°50'40.4" E 93°16'24.2", 1636 m a.s.l.) is an area occupied by *Pinus sibirica* krummholz form with the height up to 1 m and stems diameter of 3 to 5 cm.

SP2 (N 52°50'26.3" E 93°16'26.9") is a sparse pure forest of *Pinus sibirica* with canopy



Fig. 1. The studied area on Russia's map (left). A photograph of the sample plot (red line on the right)

closure of about 0.1, tree height up to 5 m, and stem diameter of 8 to 12 cm.

SP3 (N 52°50'17.2" E 93°16'21.0", 1505 m a.s.l.) is a mixture short-grass forest of *Pinus sibirica* and *Abies sibirica* Ledeb. with a proportion of ca. 6P4A. The canopy closure is 0.4. *Pinus sibirica* trees are 15 m in height and 15 to 20 cm in diameter.

SP4 (N 52°50'14.6" E 93°15'28.4", 1455 m a.s.l.) is a mixture tall-grass forest of the pine and fir with *Abies sibirica* domination, the proportion being ca. 6A4P. The canopy closure is 0.7. The height of pine stems reaches up to 15 m and the diameter 15 to 20 cm.

On the southward slopes of the mountain chain in the study area, the upper limit of *P. sibirica* distribution has been estimated to be between 1500 and 1600 m a.s.l. [10]. The frontline where pine trees having a typical tree-like form with upright stems may be found goes between SP1 and SP2. The treeline is about between SP2 and SP3. The sample plots are located on the southward slope, with SP4 being at the bottom of the hill on a flatter area.

The sample trees were young specimens of Siberian pine of ca. 40 years old. On each sample plot, 20 trees were chosen and three second-order shoots were taken from middle crown part of each tree. Thus, the total number of sample shoots amounted 240 at each sampling season. The sampling seasons were spring (April 2023 and 2024), summer (July 2023 and 2024), and autumn (November 2023). In April and November, the transportation of the specimens was done in a car-based refrigerator Alpicool TW-35 with the negative temperature function. The temperature during the transportation was as the air temperature at the needles' sampling.

The measurements of the chlorophyll fluorescence were performed within 24 hours after samplings with the help of fluorimeters Junior PAM and IMAGING-PAM M-Series MAXI Version (Heinz Walz GmbH, Germany) under the photosynthesis curve record mode, three replicas per measurement.

The recorded data were treated through the WinControl software [20]. To assess the speed of breaking of winter dormancy, the pine shoots were set in the water and kept in this condition for 10 days under +24 °C and daylight fluorescent lamps.

This part of analysis (abscisic acid detection and measurement) was performed in accordance with the methods described by Rudikovskii et al. [21]. The sample from every tree was combined from three shoots' samples.

The extraction of carotenoids and chlorophylls was performed in accordance with the methods described in [22–24], three replicas from every shoot.

Statistical analysis was done with the help of SigmaPlot 12.5 software. The indicators mean \pm mean error ($M \pm m$) are calculated. Normality of data was estimated through Shapiro-Wilk test. In case of successful normality test, to estimate the significance of differences among several variables ANOVA was applied. The difference between two variables was explored through Student's *t* test. In case the data distribution was different from normality, non-parametrical Mann-Whitney test was applied. For multiple comparisons, one-way ANOVA Tukey test was used. On the graphs, lowercase letters, plus (+) and asterisks (*) signs denote the significant differences at $p < 0.05$.

Results and Discussion

For conifers occupying habitats above the treeline, the main risks are twofold. Firstly, it is high solar radiation in spring and early summer. Pioneer trees are exposed to high irradiances, which supports fast growth but also give rise to the danger of photoinhibition [25]. The radiation leads to photoinhibition of photosynthesis at the background of low though positive temperatures. The second risk is a short vegetation period. In autumn, when trees evoke the mechanisms to withstand the cold and are about to enter the winter dormancy, some negative consequences are possible due to abrupt frosts and fast freezing shallow soil. The studies undertaken in spring,

summer, and autumn gave the opportunity to follow the seasonal variations of the photosynthetic apparatus functioning as well as the variation in the pigments in Siberian pine.

Figure 2 depicts changes of maximum rate of non-cyclical electron transport (ETR) as well as abscisic acid content at a dormancy breaking of the needles in April and transition from growth to winter dormancy in November.

According to the data obtained, the needles' ETR increase took place in two days (SP4), 5 days (SP3), 8 days (SP2) after their placement under laboratory conditions. The needles from SP1 have not broken the dormancy after 10 days in laboratory (Fig. 2). These data correspond well to the ABA content in needles. The

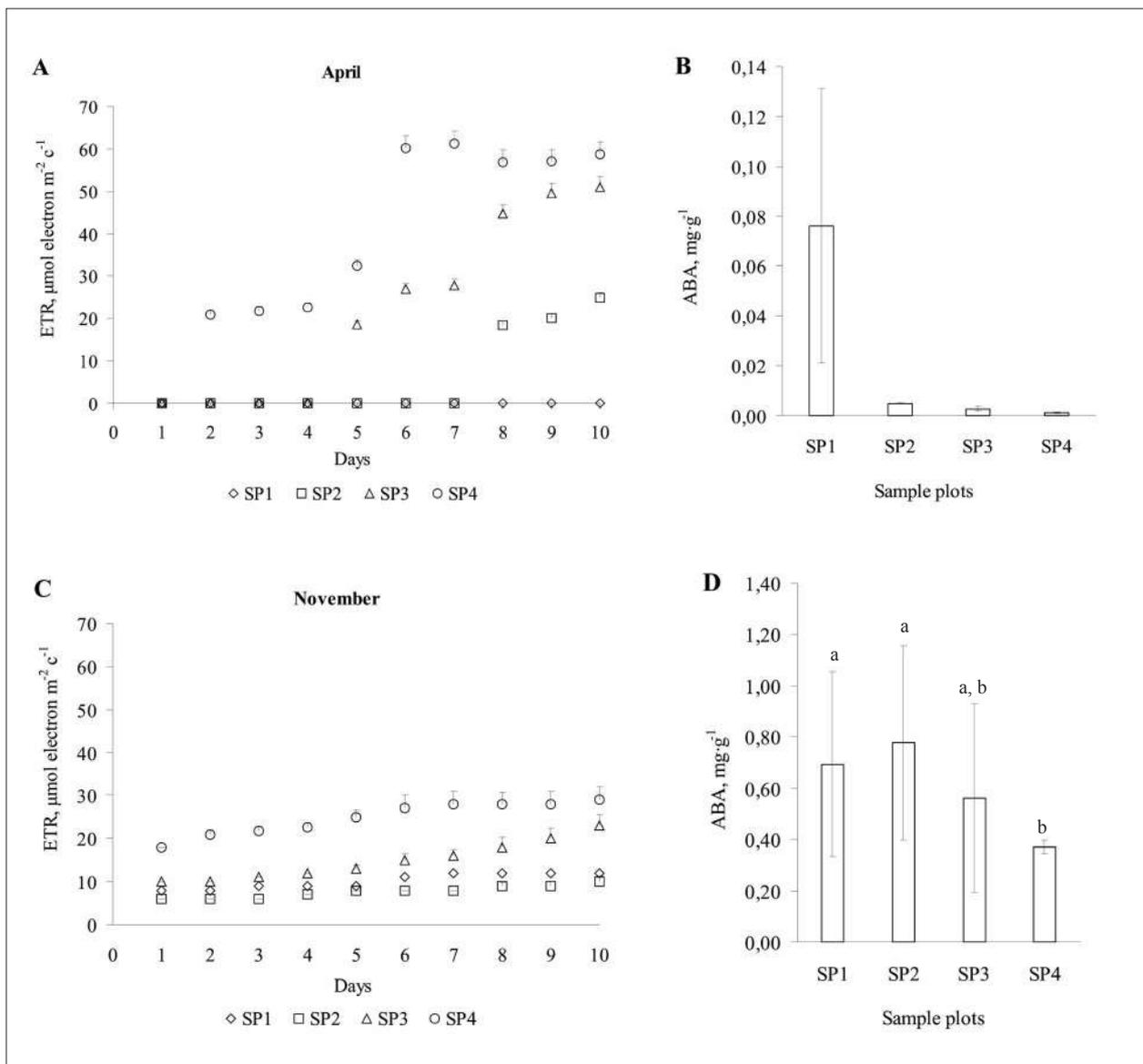


Fig. 2. The depth of the needles' winter dormancy as estimated through non-cyclical electron transport (ETR) dynamics at the breaking of winter dormancy in the laboratory (A, C) and abscisic acid (ABA) content (B, D) among the sample plots (SP). The marks *a* and *b* indicate significant differences in the parameter between the test areas at $p < 0.05$

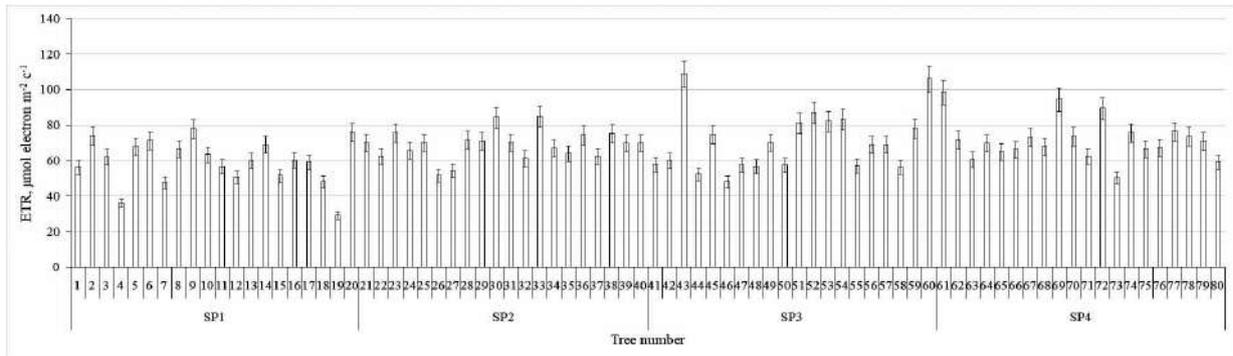


Fig. 3. The maximum rate of non-cyclical electron transport (ETR) in needles of Siberian pine [19]

maximal ABA content was observed on SP1 and was significantly lower on other sample plots achieving the minimum on SP4. Supposedly, the distribution of ABA among sample plot reflects a lower environmental stress exerted on trees.

In November, ETR values were above zero on the day of sampling. They grew in the laboratory much slower than in spring. It is explained by the accumulation of ABA during the transition to winter dormancy. The highest electron transport rate was found in needles on SP4 for which the ABA content is low.

In July, an express estimation of the maximal rate of non-cyclical electron transport (ETR) was done for the 80 sample trees in situ with the help of PAM fluorimeter Junior-PAM (Fig. 3).

A one-way ANOVA showed a significant difference in ETR ($p < 0.05$) between SP1 and any other sample plot (Fig. 3). No significant difference in ETR between SP2, SP3, and SP4 has been found. For all the studied trees from forest communities (SP3 and SP4) as one sample, the correlation coefficient between the

maximum speed of electronic transport, ETR, and the absolutely dry mass of needles has the value 0.85. Lower correlation coefficients were received on the upper sample plots SP1 and SP2 (0.58 and 0.57, correspondingly). This may be due to a shorter growing season, when it is necessary to increase biomass in a short time, and the needles photosynthesize more actively. The high variability of the parameter in Siberian pine within every sample plot may be an evidence of trees' different adaptability to the local conditions and different success of them in the biomass growth [16]. After ETR estimation in each of the 80 sample trees within the sample plots, four specimens of pines were selected that showed contrasting minimal and maximal ETR values (Fig. 3). The samples from the selected trees have been taken for a deeper analysis in the laboratory. The fluorescent properties of the needles (Fig. 4) and photosynthetic pigments composition (Fig. 5) were studied.

In April, the mean values of maximum photochemical quantum yield of photosystem

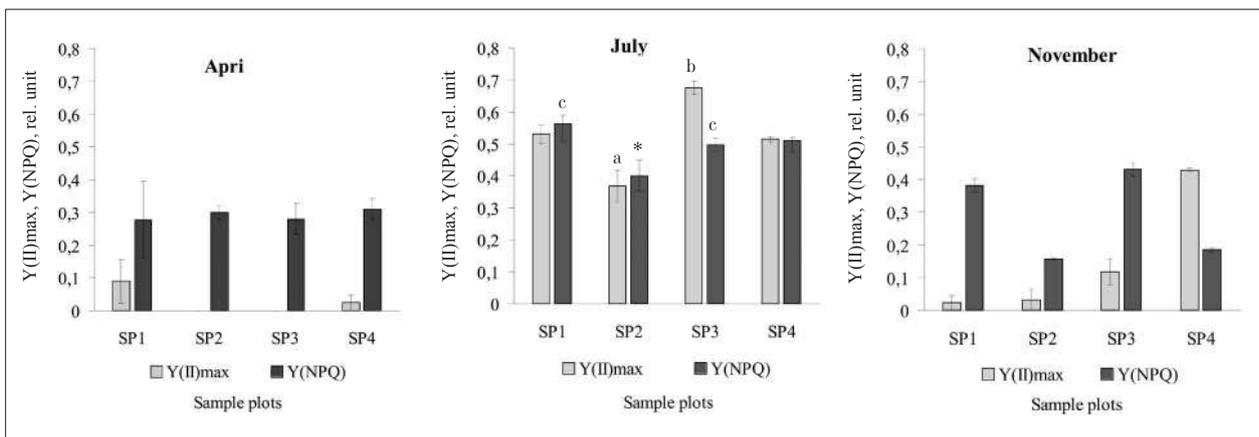


Fig. 4. Seasonal changes of maximum photochemical quantum yield of photosystem II, $Y(II)_{\text{max}}$, and quantum yield of light-induced non-photochemical fluorescence quenching, $Y(NPQ)$, in *Pinus sibirica* needles. The marks *a*, *b* and *c* indicate significant differences between sample plots in the $Y(II)_{\text{max}}$, * - in $Y(NPQ)$ ($p < 0.05$)

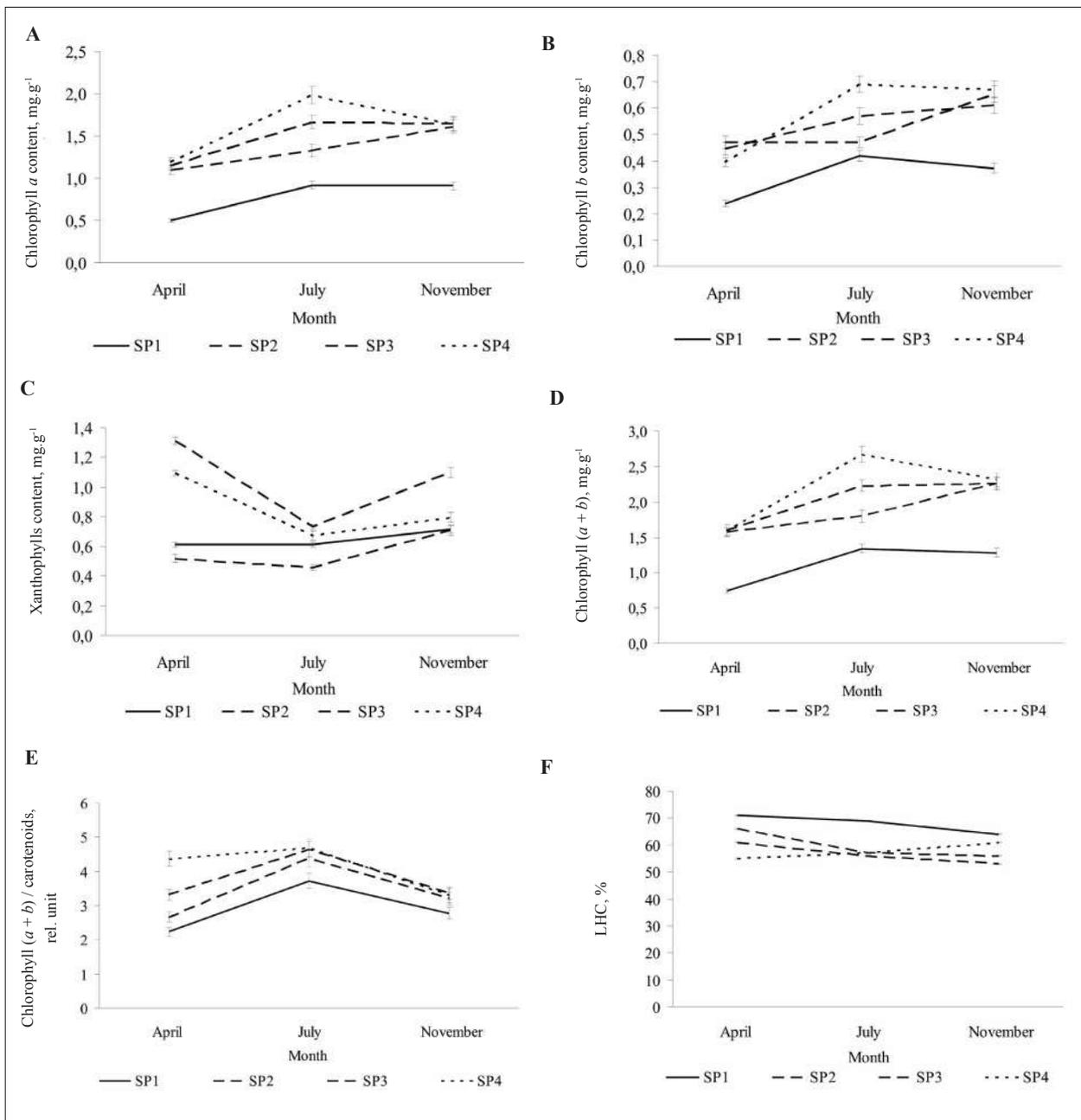


Fig. 5. Seasonal variations of chlorophyll *a* (A), chlorophyll *b* (B), xanthophylls (C), chlorophyll *a+b* (D), chlorophyll to carotenoids ratio (E), light-harvesting complexes – LHC (F) in Siberian pine needles, recalculated to dry mass

II ($Y(II)_{max}$) for SP1 are higher than for other sample plots, the variability being quite significant. An explanation may be that the shoots are partly covered by snow. The quantum yield of light-induced non-photochemical fluorescence quenching ($Y(NPQ)$) values on all the sample plots amounts a half of the summer maximal values. In spring, no significant differences for this parameter were found among the sample plots.

In July, the $Y(II)_{max}$ value was recorded in needles from SP3. It is the sample plot where Siberian pine dominates in the stand. On SP4 where the *Abies sibirica* trees are dominated,

the $Y(II)_{max}$ value in Siberian pine is lower. On the uppermost SP1, the potential photochemical activity of photosystem II was high but due to low chlorophyll and high light-harvesting complexes (LHC) complex (Fig. 7). ETR was lower compared to other sample plots. The $Y(NPQ)$ values exceeding the $Y(II)_{max}$ values are recorded in needles on SP1 and SP2 where a dissipated as heat excess energy is required.

In November, the $Y(II)_{max}$ values go down up the slope. The $Y(NPQ)$ values decrease relative the summer levels but the ratios of the values among the sample plots are preserved.

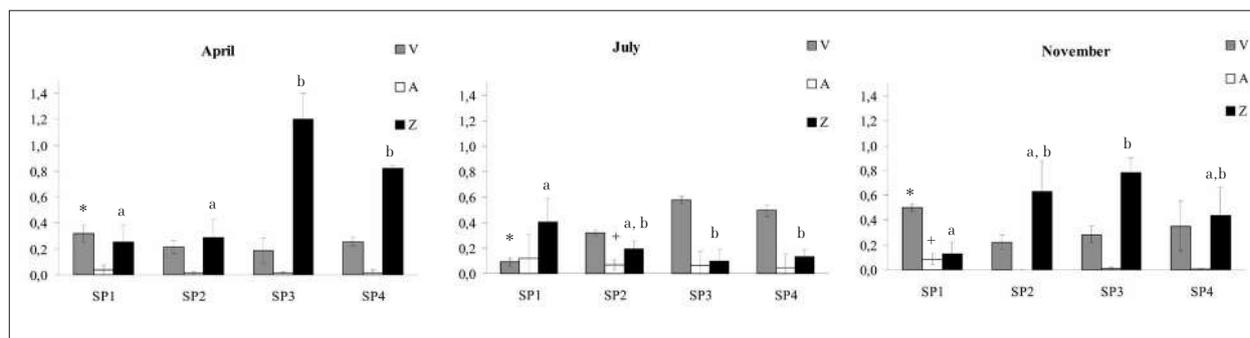


Fig. 6. Seasonal variations of carotenoid proportions in xanthophyll cycle in *Pinus sibirica* needles: V – violaxanthin, A – antheraxanthin, Z – all three stereoisomers of zeaxanthin. The marks *a*, *b* and *c* indicate significant differences between sample plots in the zeaxanthin content, * – in the violaxanthin content, + – in the anthraxanthin content ($p < 0.05$)

Figure 5 depicts the seasonal variations of photosynthetic pigment content in Siberian pine needles from different altitudes.

The minimal chlorophyll content in Siberian pine needles is recorded in spring (April), while the maximal in summer (July) (Fig. 5 A, B, D). However, the content levels differ on among the sample plots. Regarding chlorophyll *a* (Fig. 5A), the statistically significant differences ($p < 0.05$) are found for SP1 relatively all other sample plots. In July, all the sample plots differ significantly. In November, SP3 and SP4 do not differ significantly.

Regarding chlorophyll *b* content (Fig. 5B) in winter/spring on SP1, it differs significantly ($p < 0.05$) from all other sample plots. In summer, SP1 does not differ from SP2. In autumn, SP2 does not differ from SP3. It should be mentioned that the highest chlorophyll *b* content is found in forested sample plots (SP3, SP4) while minimal in plots above the treeline, SP2 and especially SP1. This relationship is recorded for SP1 round the year and for other sample plots in summer, at the time of active vegetation.

On the SP2 to SP4, the quantitative differences of chlorophyll content are likely due to differences in illumination conditions. For SP1 Siberian pine growing above the treeline as krummholz, the lowered chlorophyll content may be an adaptation trait. Likely, this is a common feature of conifer saplings under excessive light conditions. The similar data were obtained for *Pinus sylvestris* and *Picea obovata* saplings on clear-cut sites [26]. The dynamics of the total chlorophyll *a* + *b* had generally the same trend that of chlorophyll *a* alone.

The xanthophylls content of (Fig. 5C) was higher in spring, decreases in summer and increases again in autumn.

In plant acclimation to light stress under low temperatures, the xanthophyll cycle plays

an important role that takes part in the non-photochemical fluorescence quenching. Under frost acclimation, the non-photochemical fluorescence quenching mediated by zeaxanthin transforms from a short-term dynamic reaction into a long-term stable quenching during all the winter season [27].

The minimal values of chlorophyll/carotenoids ratio were characteristic right of SP1 (Fig. 5E). At the absence of photosynthetic activity, there is no need in heat energy dissipation, which is also seen in a low proportion of zeaxanthin to violaxanthin (Fig. 6). Needles of trees from SP3 and SP4 are in dormancy in April but potentially ready to exit from the state under elevated temperature. That is why the proportion of zeaxanthin in xanthophyll complex is significantly higher.

In November, the $Y(II)_{max}$ high levels were only in needles of trees on the lowermost sample plot SP4 (Fig. 4). The above indicates the preserved photosynthetic activity and a minimal role of non-photochemical quenching. The trees from SP2 and SP3 are in a transition from active functioning to the winter dormancy. Their needles contain zeaxanthin several times more than violaxanthin. In summer, the levels of xanthophyll are lowering. An elevated zeaxanthin relative to violaxanthin can be found only in needles from SP1 where the sunlight dissipation and non-photochemical quenching of fluorescence is required.

Ruban [28] reported that the mechanism of the light-dependent non-photochemical depression is effective only under closed reaction centers in photosystem II, that is, under high illumination. In the literature [29, 30], there are evidences that the stress vulnerability increases under high illumination. The cause is that stress being the source of various metabolic disorders impacts the energetic exchange and firstly the photosynthesis. In this case, a plant corrects of

input and the use of light energy as a simplest way to adapt and correct the metabolism [28]. So, the mechanism of non-photochemical depression is included as a component in the system of non-specific plant reaction under stress.

Conclusions

The evaluations of the results should be done in the terms of a comparison of the adaptations of Siberian pine from the habitats above and at the treeline with the typical forest habitats. At higher altitudes, the length of seasonal growth obviously decreases. In spring, a standard situation is that the needles are in the necessary dormancy while the solar radiation reaches high levels. The light dependent mechanisms protecting the photosynthetic apparatus are not yet active. Thus, Siberian pine plants use various survival strategies above and below the treeline. It is manifested in seasonal changes of pigment complexes and parameters of chlorophyll fluorescence of needles. High ETR values are typical for trees with the highest biomass of needle for all sample plots. Regarding the maximum quantum yield of photosystem II, $Y(II)_{max}$, and quantum yield of light-induced non-photochemical fluorescence quenching, $Y(NPQ)$, Siberian pine trees growing above the forest boundary and having mechanisms for dissipating excess light energy have a clear advantage in gaining needle mass over other plants from the same sample plot. For trees from other sample plots, a high proportion of non-photochemical quenching is rather a hindrance. Another parameter that has high correlation coefficients with needle mass for all sample plots is the chlorophyll content. The concentration of carotenoids, even in summer, is especially important for plants on the upper sample plot (SP1), which is in good agreement with the need of processes of non-photochemical quenching.

Thus, the considered parameters of chlorophyll fluorescence and the pigment composition of needles can be used to identify *Pinus sibirica* specimens that are resistant to habitat conditions above the forest boundary, their subsequent use in breeding to increase the area of forested areas under climate change conditions has a practical perspective.

This research was funded by Russian Science Foundation to the research project: “Intrapopulation variability of ecophysiological features of Siberian pine (Pinus sibirica Du Tour) trees under climate change”, grant number 23-24-00251.

References

1. Lyu L., Suvanto S., Nöjd P., Henttonen H.M., Mäkinen H., Zhang Q.B. Tree growth and its climate signal along latitudinal and altitudinal gradients: comparison of tree rings between Finland and the Tibetan Plateau // *Biogeosciences*. 2017. V. 14. P. 3083–3095. doi: 10.5194/bg-14-3083-2017
2. Klinge M., Dulamsuren C., Erasmi S., Karger D.N., Hauck M. Climate effects on vegetation vitality at the treeline of boreal forests of Mongolia // *Biogeosciences*. 2018. V. 15. P. 1319–1333. doi: 10.5194/bg-15-1319-2018
3. Kruse S., Gerdes A., Kath N.J., Epp L.S., Stoof-Leichsenring K.R., Pestryakova L.A., Herzschuh U. Dispersal distances and migration rates at the arctic treeline in Siberia – a genetic and simulation-based study // *Biogeosciences*. 2019. V. 16. No. 6. P. 1211–1224. doi: 10.5194/bg-16-1211-2019
4. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A. Alpine ecotone in the Siberian Mountains: vegetation response to warming // *J. Mt. Sci.* 2021. V. 18. P. 3099–3108. doi: 10.1007/s11629-021-6876-2
5. Grigoriev A.A., Shalaumova Yu.V., Vyukhin S.O., Balakin D.S., Kukarskikh V.V., Vyukhina A.A., Camarero J.J., Moiseev P.A. Upward treeline shifts in two regions of Subarctic Russia are governed by summer thermal and winter snow conditions // *Forests*. 2022. V. 13. Article No. 174. doi: 10.3390/f13020174
6. Moiseev P.A., Hagedorn F., Balakin D.S., Bubnov M.O., Devi N.M., Kukarskikh V.V., Mazepa V.S., Vyukhin S.O., Vyukhina A.A., Grigoriev A.A. Stand biomass at treeline ecotone in Russian Subarctic Mountains is primarily related to species composition but its dynamics driven by improvement of climatic conditions // *Forests*. 2022. V. 13. Article No. 254. doi: 10.3390/f13020254
7. Petrov I.A., Shushpanov A.S., Golyukov A.S., Dvinskaya M.L., Kharuk V.I. Dynamics of tree and shrub vegetation in the Eastern Sayan Mountain Tundra // *Russ. J. Ecol.* 2021. V. 52. P. 399–405. doi: 10.1134/S1067413621050118
8. Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L. Forest-tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia // *Scand. J. For. Res.* 2010. V. 25. No. 3. P. 224–233. doi: 10.1080/02827581003766959
9. Petrov I.A., Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T. Reaction of coniferous trees in the Kuznetsk Alatau alpine forest-tundra ecotone to climate change // *Contemp. Probl. Ecol.* 2015. V. 8. P. 423–430. doi: 10.1134/S1995425515040137
10. Pakharkova N., Borisova I., Sharafutdinov R., Gavrikov V. Photosynthetic pigments in Siberian pine and fir under climate warming and shift of the timberline // *Forests*. 2020. V. 11. Article No. 63. doi: 10.3390/f11010063
11. Tantsyrev N.V., Shobairi S.O.R., Usoltsev V.A., Sun L., Zhang H., Li C., He J., Hemmati Roudbari S., Asghari Beirami B., Ayombekov Q. Geographical pecu-

- liarities of *Pinus sibirica* Du Tour natural regeneration as related to its seed crops // *Curr. World Environ.* 2024. V. 19 No. 1. P. 109–123. doi: 10.12944/CWE.19.1.4
12. Velisevich S.N., Bender O.G., Goroshkevich S.N. The influence of scion donor tree age on the growth and morphogenesis of Siberian stone pine grafts // *New Forests.* 2020. V. 52. P. 473–491. doi: 10.1007/s11056-020-09805-2
13. Furbank R.T., Tester M. Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck // *Trends Plant Sci.* 2011. V. 16. No. 12. P. 635–644. doi: 10.1016/j.tplants.2011.09.005
14. Demidchik V.V., Shashko A.Y., Bandarenka U.Y., Smolikova G.N., Przhivalskaya D.A., Charnysh M.A., Pozhvanov G.A., Barkosvkiy A.V., Smolich I.I., Sokolik A.I., Yu M., Medvedev S.S. Plant phenomics: fundamental bases, software and hardware platforms, and machine learning // *Russ. J. Plant Physiol.* 2020. V. 67. No. 3. P. 397–412. doi: 10.1134/S1021443720030061
15. Rolfe S.A., Scholes J.D. Chlorophyll fluorescence imaging of plant-pathogen interactions // *Protoplasma.* 2010. V. 247. P. 163–175. doi: 10.1007/s00709-010-0203-z
16. Dutta S., Cruz J.A., Jiao Y., Chen J., Kramer D.M., Osteryoung K.W. Non-invasive, whole-plant imaging of chloroplast movement and chlorophyll fluorescence reveals photosynthetic phenotypes independent of chloroplast photorelocation defects in chloroplast division mutants // *Plant J.* 2015. V. 84. No. 2. P. 428–442. doi: 10.1111/tpj.13009
17. Kalaji H.M., Jajoo A., Oukarroum A., Brestic M., Zivcak M., Samborska I.A., Cetner M.D., Łukasik I., Goltsev V., Ladle R.J. Chlorophyll *a* fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions // *Acta Physiol. Plant.* 2016. V. 38. Article No. 102. doi: 10.1007/s11738-016-2113-y
18. Smolikova G., Kreslavski V., Shiroglazova O., Bilova T., Sharova E., Frolov A., Medvedev S. Photochemical activity changes accompanying the embryogenesis of pea (*Pisum sativum*) with yellow and green cotyledons // *Funct. Plant Biol.* 2018. V. 45. No. 2. P. 228–235. doi: 10.1071/FP16379
19. Pakharkova N.V., Gaevsky N.A., Gette I.G. Parameters of *Pinus sibirica* photosynthetic apparatus for phenotyping trees in the high-altitude zone of the Western Sayan // *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* 2024. V. 17. No. 2. P. 119–133 (in Russian).
20. WALZ – High Quality Instrumentation for Plant Sciences [Internet resource] <http://www.walz.com> (Accessed: 15.11.2024).
21. Rudikovskii A.V., Stolbicova A.V., Rudikovskaya E.G., Dudareva L.V. Role of phytohormones in the formation of dwarf and tall Siberian crabapple (*Malus baccata* L. Borkh.) // *Zemdirbyste.* 2019. V. 106. No. 2. P. 167–172. doi: 10.13080/z-a.2019.106.022
22. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology* / Eds. S.P. Colowick, N.O. Kaplan. San Diego: Academic Press, 1987. P. 350–382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
23. Küpper H., Seibert S., Parameswaran A. Fast, sensitive, and inexpensive alternative to analytical pigment HPLC: quantification of chlorophylls and carotenoids in crude extracts by fitting with Gauss peak spectra // *Anal. Chem.* 2007. V. 79. No. 20. P. 7611–7627. doi: 10.1021/ac070236m
24. Rudikovskaya E.G., Dudareva L.V., Shishparenok A.A., Osipova S.V., Stavitskaya Z.O., Rudikovskii A.V. Peculiarities of accumulation of photoprotective compounds by fruit of Siberian crabapple, *Malus domestica* Borkh. and their hybrids growing in conditions of Eastern Siberia // *Sci. Hortic.* 2019. V. 253. P. 303–308. doi: 10.1016/j.scienta.2019.04.034
25. Robakowski P. Susceptibility to low-temperature photoinhibition in three conifers differing in successional status // *Tree Physiol.* 2005. V. 25. No. 9. P. 1151–1160. doi: 10.1093/treephys/25.9.1151
26. Tuzhilkina V.V. Photosynthetic activity of coniferous undergrowth in connection with industrial logging // *Theoretical and Applied Ecology.* 2024. No. 2. P. 22–28 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-022-028
27. Öquist G., Huner N.P.A. Photosynthesis of overwintering evergreen plants // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2003. V. 54. P. 329–355. doi: 10.1146/annurev.arplant.54.072402.115741
28. Ruban A.V. Evolution under the sun: optimizing light harvesting in photosynthesis // *J. Exp. Bot.* 2015. V. 66. No. 1. P. 7–23. doi: 10.1093/jxb/eru400
29. Pospíšil P. Mechanisms of non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching in higher plants // *Photosynthetica.* 1997. V. 34. P. 343–355. doi: 10.1023/A:1006803832366
30. Maslova T.G., Markovskaya E.F., Slemnev N.N. Functions of carotenoids in leaves of higher plants (review) // *Biol. Bull. Rev.* 2021. V. 11. No. 5. P. 476–487. doi: 10.1134/S2079086421050078

Непроизводственные биологические ресурсы постболотных лесолуговых агроландшафтов

© 2026. Н. А. Уланов^{1,2}, к. с.-х. н., доцент, с. н. с.,

А. Н. Уланов^{1,2}, д. с.-х. н., профессор,

заместитель директора по научной работе,

¹Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133,

²Кировская лугоболотная опытная станция – филиал ФНЦ
«ВИК имени В. Р. Вильямса»,

612097, Россия, Кировская область, Оричевский район, п. Юбилейный, д. 33,
e-mail: ulanov-n-a@mail.ru, bolotoagro50@mail.ru

На примере постболотного лесолугового агроландшафта «Гадовское» Кировской области, используемого в различных сферах природопользования, проводится экологическая оценка непроизводственных природных ресурсов как альтернативы традиционному кормопроизводству. В своём современном виде бывшее болото превратилось в качественно новый агроландшафт, где чередуются луговые травостои, пашня, лесные древостои, полезащитные лесополосы, мелиоративные каналы, участки экологического обводнения. Самыми востребованными ресурсами у населения традиционно считаются грибные, представленные 55 видами. Наиболее благоприятной средой для макромицетов являются елово-сосново-берёзовые вторичные леса и приканавные лесополосы. Биологический запас плодовых тел здесь достигает 150 кг/га. Доступная грибоносная площадь около 45 га. Основу ягодных ресурсов составляют всего 12 видов. Из самовнедрившихся дикоросов наибольшей продуктивностью и устойчивостью к погодным условиям выделяются: рябина обыкновенная, шиповник, земляника, костяника. Из искусственно культивируемых – клюква сортовая. Разнообразие лекарственных растений превышает 200 видов. Их присутствие наблюдается во всех структурных элементах агроландшафта. Наибольшим спросом у заготовителей сырья пользуются крапива двудомная, Иван-чай узколистный, змеевик большой, щавель конский, багульник болотный, сабельник болотный, плаун булавовидный, пижма обыкновенная. Сформировавшаяся конструкция ландшафта с хорошо развитым экологическим каркасом в условиях низкого агрофона является идеальной средой обитания для многих промысловых видов животных: только постоянно проживающих на этой территории видов более 20. Интенсивнее всех заселяют залесённые участки и производственные поля популяции речного бобра. В структуре ландшафта лесопокрытая площадь составляет около 25 %. Вторичные древостои получили наибольшее развитие на хорошо осушенных торфянисто-глебовых выработанных почвах и возле осушителей. В 40–60-летнем возрасте запас древесины на этих участках составляет 400–600 м³/га. Лесной фитоценоз здесь рассматривается как источник товарного сырья, но, в большей степени, как среда обитания выше отмеченных ресурсов.

Ключевые слова: выработанные торфяники, кормовые поля, вторичный древостой, полезащитные лесополосы, мелиоративные каналы, постболотный лесолуговой агроландшафт, непроизводственные биологические ресурсы.

Non-productive biological resources in post-bog forest-meadow agricultural landscapes

© 2026. N. A. Ulanov^{1,2} ORCID: 0009-0007-7954-0411, A. N. Ulanov^{1,2} ORCID: 0009-0005-3265-3254

¹Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky prospect, Kirov, Russia, 610017,

²Kirov Meadow-Swamp Experimental Station – branch FSC “AIF named after V.R. Williams”,
33, Yubileyny, Orichvskiy district, Kirov Oblast, Russia, 612097,

e-mail: ulanov-n-a@mail.ru, bolotoagro50@mail.ru

Non-production natural resources are considered an alternative to traditional forage production. We carried out an environmental assessment of the above using case-study of the “Gadovskoye” post-bog forest-meadow agricultural landscape (Kirov Oblast, Russia). In its modern guise, the former bog has turned into a qualitatively new agricultural landscape, where meadow grasslands, arable land, forest stands, shelter belts, ameliorative ditches, and areas of ecological water supply alternate in a certain mosaic. Mushrooms are traditionally considered to be the most popular resources, represented in the studied area by 55 species. Spruce-pine-birch secondary forests and adjacent shelter belts are the most

favorable environment for macromycetes. The biological stock of fruiting bodies here reaches 150 kg/ha. The available mushroom-bearing area is about 45 hectares. The basis of berry resources consists of only 12 species. *Sorbus aucuparia* L., *Rosa canina* L., *Fragaria vesca* L., and *Rubus saxatilis* L. are the most productive and weather-resistant self-grown wild plants. Varieties of *Oxycoccus palustris* Pers. is artificially cultivated ones. The variety of medicinal plants exceeds 200 species. They present in all structural elements of the agricultural landscape. *Urtica dioica* L., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Bistorta officinalis* Delarbre, *Rumex confertus* Willd., *Ledum palustre* L., *Comarum palustre* L., *Lycopodium clavatum* L., *Tanacetum vulgare* L. are the most in demand among raw material producers. The formed landscape structure with a well-developed ecological framework in conditions of a low agricultural background is an ideal habitat for many commercial animal species. There are more than 20 species permanently residing in this territory. The *Castor fiber* L. populations inhabit the forested areas and production fields most intensively. The forested area is about 25 % in the structure of the landscape. Secondary stands have received the greatest development on well-drained peaty gley depleted soils and near lateral ditches. The stock of wood aged 40–60 years is 400–600 m³/ha in these areas. The forest phytocenosis is considered here as a source of commercial raw materials, but to a greater extent as a habitat for the above-mentioned resources.

Keywords: depleted peat bog, forage fields, secondary stand, shelter belts, ameliorative ditches, post-bog forest-meadow agricultural landscape, non-productive biological resources.

Болотные экосистемы являются важнейшими источниками уникальнейших геобиохимических, сырьевых и биологических ресурсов на планете. Прежде всего, это пресные воды, торф, лекарственные и медоносные растения, ягоды, грибы, а также промысловая дичь и рыбы [1–3].

Активная антропогенная деятельность коренным образом преобразует исходные компоненты болотных экосистем. Меняются микроклимат, водный режим, параметры биогеохимических циклов углерода, азота и других биогенных элементов [4]. Происходит изменение рельефа и структуры почвенного покрова, уменьшается ландшафтное и биологическое разнообразие, уничтожаются традиционные места обитания болотных и околотовных птиц и зверей, в результате чего из ландшафтов исчезают целые виды уникальных представителей флоры и фауны [5, 6].

Начиная с 30-х годов XX века, Россия продолжает использовать болотные экосистемы для добычи торфяного сырья. Только в Нечернозёмной зоне площадь выработанных торфяников приближается к 1,5 млн га. Кировская область – один из регионов РФ, наиболее активно разрабатывающих свой торфяной фонд, где добывается около 40 % от общего по стране количества торфяного сырья [4]. В настоящее время практически все средние и крупные низинные торфомассивы области частично или полностью выработаны. Общее количество выработанных торфяников около 100 тыс. га.

В процессе осушения болот, сведения травяно-кустарниковой болотной растительности, освоения и последующего торфоизвлечения, весь природно-ресурсный потенциал бывшего болота основательно преобразуется в качественном и количественном отношениях. В ненарушенном состоянии остаются лишь

края по периметру торфяного месторождения, где слой торфа меньше 0,7 м. По результатам почвенно-мелиоративного обследования, прежде всего, определяется пригодность этих земель под кормовые и лесные культуры. Под первые отводятся участки со слоем торфа более 30–50 см, под вторые – слабо или полностью сработанные ($A_T = 0–30$ см). Многолетние исследования и практика использования выработанных торфяников в кормопроизводстве показывают, что производственный эффект от этой деятельности достигается лишь при внесении высоких доз удобрений ($N_{90-180} P_{90-100} K_{90-160}$) [4]. В 70–80-х гг. XX века, когда проводилась широкомасштабная кампания по освоению выработок, такая потребность в удобрениях легко обеспечивалась. В настоящее время, когда по разным причинам из сельскохозяйственных угодий выбывает значительное количество бывшей пашни, практический интерес к этим антропогенным образованиям существенно снижается. Имеется много примеров, когда бывшие высокопродуктивные луговые угодья из-за предельно низкого агрофона и снижения работоспособности осушительной системы вырождаются, зарастают древесно-кустарниковой и болотной растительностью или переходят в стадию вторичного заболачивания. Спустя несколько десятилетий бывшие выработанные торфяники превращаются в лесолуговые постболотные агроландшафты, где доля вторичных древостоев может доминировать в общей структуре этих объектов.

Аналогичные ландшафты, по мнению специалистов, могут быть источником других, так называемых, непродуцируемых ресурсов («дары природы»), которые по объёму, общественной и хозяйственной значимости не только не уступают, но и могут превосходить кормовые [7–9]. Как уже было отмечено выше,

эти ресурсы представлены уникальным разнообразием болотной и околоводной флоры и фауны, естественная среда которых была уничтожена при освоении болот.

Цель настоящей работы – дать оценку биоресурсного потенциала сформировавшейся постболотной агроэкосистемы.

Объекты и методы исследования

Основным объектом исследований является выработанный на 80% низинный торфомассив «Гадовское» Кировской области, расположенный на левой надпойменной террасе р. Быстрицы в 30 км к западу от г. Кирова. Общая площадь болота около 3000 га. Активное использование территории первой очереди освоения (400 га, юго-восточная часть торфомассива) для выращивания кормовых, зерновых и технических культур началось в 20–30 гг. XX века [10]. В период с 1936 по 1975 гг. промышленная торфодобыча в большей части торфомассива осуществлялась послойно-фрезерным способом. Общая площадь торфоразработок составила 1900 га. Из этого количества около 400 га выработок первой очереди освоения в 1950–1965 гг. (по окончании торфодобычи) было отведено под вторичную лесную культуру (сосна обыкновенная – *Pinus sylvestris* L.). Остальная часть выработанных торфяников, по мере их выхода из производства, частями передавалась под сельскохозяйственное использование.

Со временем, бывший нарушенный болотный фитоценоз качественно изменил свой природный облик и превратился в постболотный лесолуговой агроландшафт, где кормовые поля в определённой мозаике чередуются с лесополосами и участками естественных и искусственных вторичных древостоев.

В результате снижения уровня агрофона и неотрегулированности водного режима, в последние 30 лет повсеместно наблюдается стремительная смена видового состава кормовых фитоценозов и значительное уменьшение их продуктивности. Снижается доля культурных видов трав, внедряются новые виды растений, среди которых растения с ценными пищевыми и лекарственными потребительскими свойствами. Лесопокрытая территория агроландшафта вместе с сохранившимся лесным поясом по периметру торфомассива является местообитанием грибов, по объёму плодовой массы не уступающих рядом расположенным естественным лесам.

Для оценки биоресурсного потенциала в границах современной структуры агроландшафта «Гадовское» вся его территория была условно разделена по видам и интенсивности хозяйственного использования, по степени нарушенности исходного состояния, по принадлежности наиболее значимых элементов к его экологическому каркасу.

Были выделены следующие основные объекты:

1. Искусственные и естественные древостои в виде сплошных массивов и лесных полевых защитных полос.
2. Лесной биогеоценоз по периметру торфомассива, не нарушенный при осушении и торфодобыче.
3. Выработанные участки, выведенные из всех видов хозяйственной деятельности по причине мелиоративной неустроенности.
4. Поля кормовых севооборотов разной степени окультуривания и уровня агрофона.
5. Внутридорожная сеть и примыкающая к ней территория.
6. Открытая мелиоративная сеть, дно, откосы мелиоративных каналов.
7. Противопожарные водоёмы и примыкающая к ним территория.
8. Старичная, заболачиваемая часть русла р. Быстрицы – основного водоприёмника дренажно-сбросных вод торфомассива «Гадовское».
9. Лесные массивы и сельскохозяйственные угодья на смежных к торфомассиву зональных дерново-подзолистых почвах.

После предварительного обследования всех элементов постболотного агроландшафта и окружающей территории на предмет наличия, количества, типичности, частоты встречаемости и доли присутствия в общей структуре постболотного биогеоценоза, на каждом из этих объектов оборудована сеть контрольно-мониторинговых учётных площадок. Размеры площадок зависят от вида ресурса. Так, для ягодных и лекарственных видов учётная площадь составляла 25–100 м², для грибных и древесных ресурсов – 100–400 м². Повторность 5–10-кратная.

Наблюдения за охотничье-промысловой фауной осуществлялись путём летних и зимних маршрутных учётов и в системе постоянных мониторинговых биоплощадок (галечниках, порхалищах, солонцах, подкормочных сооружениях и др.) [11–13]. У большинства растений учёт проводился в период массового цветения (лекарственных) и плодоношения (ягодных). Замер фитомассы лекарственных

растений проводился с учётом того, какая часть растения используется в качестве источника сырья [14]. Так, для растений, у которых наибольшую ценность представляют корни (валериана лекарственная (*Valeriana officinalis* L.), дягиль лекарственный (*Archangelica officinalis* Hoffm.), щитовник мужской (*Dryopteris filix-mas* (L.) Schott), змеевик большой (*Bistorta officinalis* Delarbre), щавель конский (*Rumex confertus* Willd.) и др.), учитывалась наземная и подземная части. У сабельника болотного (*Comarum palustre* L.) летом производился отбор стебельно-лиственной части, осенью наибольший интерес представляли корневища. У пижмы обыкновенной (*Tanacetum vulgare* L.) учитывались соцветия, у пырея ползучего (*Elytrigia repens* (L.) Nevski) – масса корневищ, у плауна булавовидного (*Lycopodium clavatum* L.) – споры в спороносных колосках и т. д.

Для оценки общих ресурсов на территории всего агроландшафта результаты учёта с контрольно-мониторинговых площадок экстраполировались на однотипные фитоценозы с учётом примерной площади их распространения. Учёт единично или рассеянно встречающихся растений производили путём персонального учёта каждого вида на определённом структурном элементе ландшафта [15, 16]. Учёт грибных ресурсов проводили по методикам [14, 17–19]. Степень востребованности грибных и ягодно-лекарственных ресурсов определяли путём анкетирования и опроса местных жителей.

Результаты и обсуждение

Грибные ресурсы. Установлено, что биологические ритмы развития грибной биоты на зональных почвах (дерново-подзолистых) несколько отличаются от почв интразональных, к которым относятся торфяные и выработанные почвы. В многолетнем цикле, в условиях выработок, проявление максимальной грибоносной активности происходит с периодичностью 2 года из 5 лет и в значительной степени зависит от обеспеченности и распределения во времени осадков и активных температур. Общая грибоносная площадь агроландшафта «Гадовское» в его современном состоянии составляет около 60 га. Доступная для посещения сборщиками грибоносная площадь с учётом коэффициента транспортной доступности составляла всего 45 га. Видовое разнообразие грибов-макромицетов представлено 55 видами, относящимися к 14 семействам

и 19 родам. По многолетним данным, наибольшее число видов (45) отмечено в 50-летнем елово-сосновом фитоценозе искусственного происхождения, наименьшее (25) – в 30-летнем ивово-осиновом фитоценозе естественного происхождения.

Общий биологический запас плодовых тел макромицетов на территории агроландшафта «Гадовское» в урожайные годы составлял 110–130 кг/га, общий эксплуатационный запас – 70–90 кг/га. Максимальной урожайностью отличались подберёзовик обыкновенный (*Leccinum scabrum* (Bull.) Gray) – 10–12 кг/га, сыроежка берёзовая (*Russula betularum* Hora) – 9–11 кг/га, белый гриб (*Boletus edulis* Bull.) – до 9 кг/га, волнушка розовая (*Lactarius torminosus* (Schaeff.) Pers.) – 8–9 кг/га и подосиновик красный (*Leccinum aurantiacum* (Bull.) Gray). На их долю приходилось до 60–65 % от всего урожая.

Наиболее благоприятной средой для произрастания грибов-макромицетов в условиях старопашотных выработанных торфяников являлись выбросы минерального грунта, перемешанные с торфяным субстратом, сформированные при прокладке мелиоративных каналов, под покровом елово-берёзово-осинового древостоя. Биологический запас грибов здесь достигал 150 кг/га, эксплуатационный – 90 кг/га. Самым низкопродуктивным являлся ивово-осиновый фитоценоз естественного происхождения с признаками застойного водного режима.

Общая товарная стоимость съедобных видов грибов с доступной грибоносной площади агроландшафта ($S = 45$ га) в ценах 2021–2022 гг. составляла 80–95 тыс. руб.

Ягодные ресурсы. До освоения торфяно-болотные фитоценозы, в особенности, сформированные на олиготрофных и мезотрофных залежах, являются идеальным и, по существу, единственным местообитанием для уникальнейшего природного ресурса – болотных ягод: клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.), голубики обыкновенной (*Vaccinium uliginosum* L.), водяники чёрной (*Empetrum nigrum* L.), морошки (*Rubus chamaemorus* L.), княженики обыкновенной (*Rubus arcticus* L.) и др. [20–23].

Предварительным обследованием было установлено, что новая ландшафтная конструкция также обладает определённым травянистым и древесно-кустарниковым ягодным потенциалом. В качестве персональных объектов наблюдений были выбраны наиболее встречаемые виды: черёмуха обыкновенная

(*Padus avium* Mill.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides* L.), малина обыкновенная (*Rubus idaeus* L.), смородина чёрная (*Ribes nigrum* L.), шиповник собачий (*Rosa canina* L.), земляника лесная (*Fragaria vesca* L.), костяника (*Rubus saxatilis* L.), брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.), черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.), голубика обыкновенная, клюква болотная, княженика обыкновенная.

По местообитанию в структуре агроландшафта ягодные и плодовые растения располагались следующим образом.

Древесные (рябина, черёмуха) входили в структуру полезационных лесных полос естественного происхождения на 10–15 %. По величине урожая плодов с большим преимуществом во все годы выделялась рябина. Независимо от климатических условий этот вид обеспечивал сбор с одного дерева до 6–8 кг в естественном состоянии. Биологический запас на залесённой территории составлял в среднем по годам 2,3–2,5 т, эксплуатационный – 0,25–0,30 т. Черёмуха, как источник костяковых плодов, в условиях выработанных торфяников большого практического значения не имела. По развитию древесной и плодовой биомассы она многократно уступала своим сородичам, произрастающим в условиях центральной и притеррасной поймы.

Кустарниковые виды (малина, смородина, шиповник) в некоторых лесополосах занимали самый нижний ярус (подлесок), однако, больше предпочитали размещаться обособленно, в приканавной (не скашиваемой) полосе открытых осушителей-регуляторов. Облепиха также чаще всего расселялась обособленно в приканавной полосе (а иногда и в самих каналах), образуя густо переплетённые в виде куртин заросли. Характеризовалась некоторой агрессивностью по отношению к луговой растительности. При временном прекращении скашивания стремительно занимала территорию бывшего культурного луга. Из кустарниковых видов, за исключением смородины, практически у всех формировался достаточно высокий урожай. Здесь также необходимо отметить существенную разницу в урожайности между культурными и дикорастущими видами, особенно у смородины (табл. 1).

Травянистые ягодные культуры также имеют свои ниши в структуре ландшафта. Так, земляника лесная предпочитает приканавные полосы и южные откосы мелиоративных каналов, при этом легко заселяет естественные

и рукотворные лесные массивы, а также их опушки. Черника, брусника и костяника продолжают функционировать исключительно на сохранившихся мелкозалежных окрайках торфомассива «Гадовское», которые не подвергались торфодобыче. Эти участки, как правило, расположены перед границей нагорно-ловчей части осушительной сети, поэтому достаточно хорошо осушены.

Кроме того, в плане экологической оценки возможности культивирования на выработанных торфяниках некоторых видов болотных ягод, на одном из участков, выведенных из общей пашни по причине переувлажнения, произведена высадка нескольких сортов голубики, клюквы, княженики и брусники [24]. На этом и аналогичных участках, не используемых в сельскохозяйственном производстве, под пологом сформированного естественным образом хвойно-лиственного древостоя до 20–30 % проективного покрытия мохово-травяного яруса приходится на дикорастущую бруснику и костянику.

Из травянистых видов наибольшей урожайностью отличались сорта клюквы «Тарту», «Краса Севера», «Бен Лир», «Северянка» (1600 кг/га) и брусники «Костромичка», «Костромская розовая» (1200 кг/га). Эти культуры по продуктивности в 8–10 раз превосходили диких сородичей (табл. 2). Очень низкой в засушливые годы была отмечена урожайность черники и княженики.

Тем не менее, наибольший биологический и эксплуатационный запас ягодного сырья приходится на бруснику и чернику, произрастающие по целинным краям выработанного торфомассива (табл. 2).

Лекарственные ресурсы. До осушения (1914 г.) низинное болото «Гадовское», как местообитание лекарственных растений, не отличалось большим видовым разнообразием. Небольшими популяциями чаще всего встречались вахта трёхлистная (*Menyanthes trifoliata* L.), сабельник болотный (*Comarum palustre* L.), багульник болотный (*Ledum palustre* L.), сушеница топяная (*Gnaphalium uliginosum* L.), хвощ болотный (*Equisetum palustre* L.), а по минеральным окрайкам болота – толокнянка обыкновенная (*Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng.).

В своём современном качественно новом виде, изучаемый постболотный агроландшафт характеризуется появлением значительного количества нехарактерных для этой среды перспективных в лекарственном отношении растений. В условиях изменившегося водно-

Таблица 1 / Table 1

Урожайность, запасы и масса плодов кустарниковых видов растений, среднее за 2021–2023 гг.
Shrubby plants fruits' yield, stocks and weight, average for 2021–2023

Вид Species	Ягодносная площадь, га Berry-bearing area, ha	Биологический запас, т Biological stock, t	Эксплуатационный запас, т Operational stock, t	Урожайность, кг/га Yield, kg/ha	Урожайность с 1 условного куста, г/м ² Yield from one conditional shrub, g/m ²	Масса плода, г Fruit weight, g	
						min	max
Малина обыкновенная (дикая) <i>Rubus idaeus</i> L. (wild)	13,900	5838,0	1460,0	420 ± 13	42,0 ± 1,3	0,40 ± 0,01	0,70 ± 0,03
Малина обыкновенная (в культуре) <i>R. idaeus</i> L. (in cultivation)	–	–	–	650 ± 18	65,0 ± 1,8	0,65 ± 0,02	1,20 ± 0,06
Смородина чёрная (дикая) <i>Ribes nigrum</i> L. (wild)	1,500	225,0	45,0	150 ± 5	15,0 ± 0,5	0,15 ± 0,01	0,45 ± 0,02
Смородина чёрная (в культуре) <i>Ribes nigrum</i> L. (in cultivation)	–	–	–	45000 ± 492	4500 ± 49	0,70 ± 0,03	3,30 ± 0,14
Облепиха крупновидная <i>Hippophae rhamnoides</i> L.	0,006	90,0	75,0	15000 ± 265	1500 ± 27	0,25 ± 0,01	0,51 ± 0,02
Шиповник собачий <i>Rosa canina</i> L.	0,020	166,0	120,0	8800 ± 156	880 ± 16	0,28 ± 0,01	2,85 ± 0,12

Примечание: 95 % доверительный интервал для среднего значения ($\bar{x} \pm t_{0,95} S_x$); прочерки означают, что урожайность сортовых видов ягод учитывалась в условиях наиболее продуктивных дачных участков.

Note: 95 % prediction band for the mean value ($\bar{x} \pm t_{0,95} S_x$); dashes mean that the yield of varietal types was taken into account in the conditions of the most productive suburban areas.

Таблица 2 / Table 2

Урожайность, запасы и масса плодов ягодников, 2021–2023 гг.
Berry subshrubs fruits' yield, stocks and weight, average for 2021–2023

Вид Species	Площадь угодий, га Land area, ha	Ятодоносная площадь, га Berry-bearing area, ha	Биологический запас, т Biological stock, t	Эксплуатационный запас, т Operational stock, t	Урожайность, кг/га Yield, kg/ha	Масса плода, г Fruit mass, g	
						min	max
Земляника лесная <i>F. vesca</i>	600	2,4	0,527	0,175	155 ± 7	0,22 ± 0,01	0,44 ± 0,02
Костяника <i>R. saxatilis</i>	30	5,5	1,100	0,220	200 ± 7	0,17 ± 0,01	0,20 ± 0,01
Брусника обыкновенная <i>V. vitis-idaea</i>	3000	210,0	25,200	11,500	120 ± 5	0,15 ± 0,01	0,45 ± 0,02
Брусника обыкновенная (в культуре) <i>V. vitis-idaea</i> (in cultivation)	–	–	–	–	1200 ± 40	0,20 ± 0,01	0,85 ± 0,04
Черника обыкновенная <i>V. myrtillus</i>	3000	570,0	34,200	12,000	60,0 ± 1,8	0,20 ± 0,01	0,50 ± 0,02
Голубика обыкновенная (в культуре) <i>V. uliginosum</i> (in cultivation)	–	–	–	–	700 ± 27	0,50 ± 0,02	1,20 ± 0,05
Клюква болотная (в культуре) <i>V. oxycoccos</i> (in cultivation)	–	–	–	–	1600 ± 60	1,00 ± 0,04	1,90 ± 0,09
Княженика обыкновенная (в культуре) <i>R. arcticus</i> (in cultivation)	–	–	–	–	Единично Single	–	–

Примечание: 95 % доверительный интервал для среднего значения ($\bar{x} \pm t_{0,95} S_x$); прочерки означают, что оценка продуктивности сортовых видов ягод осуществлялась в питомнике сорторазмножения ограниченной площади. / Note: 95 % prediction band for the mean value ($\bar{x} \pm t_{0,95} S_x$); dashes mean that the assessment of the productivity of varietal berry plants was carried out in a nursery of variety propagation in a limited area.

го и температурного режимов, физических и агрохимических свойств, в результате интродукции с территории смежных зональных пойменных и водораздельно-опольных агроландшафтов, в местные постболотные фитоценозы кормовых и лесных угодий внедрилось более 200 видов ценных лекарственных травянистых растений. Значительная часть из этого количества была занесена в кормовые посевы с навозом или фекальными выделениями крупного рогатого скота при пастьбе, в частности, крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), пырей ползучий, герань луговая (*Geranium pratense* L.) и болотная (*G. palustre* L.), горец почечуйный (*Persicaria maculosa* Gray). К наиболее встречаемым, максимально занимающим структурные части агроландшафта, с учётом их производственно-заготовительной значимости и востребованности у населения, можно выделить следующие группы лекарственных растений. К растениям с наибольшим сбором фитомассы относятся: крапива двудомная, будра плющевидная (*Glechoma hederacea* L.), пижма обыкновенная (соцветия); из культурных видов: пырей ползучий (корневища), овёс посевной (*Avena sativa* L.) (соцветия), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.) (соцветия). К растениям с наибольшим потенциально возможным запасом лекарственного сырья относятся Иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.) (листья), щитовник мужской (корни), горец почечуйный (стебель), плаун булавовидный (споры). К особой группе относятся виды, где в качестве сырьевого источника служит корневая масса: валериана лекарственная, змеевик большой, дудник лекарственный, щавель конский, цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus* L.), кровохлёбка лекарственная (*Sanguisorba officinalis* L.). В группу исключительно влаголюбивых видов входят сохранившиеся сабельник болотный, хвощ болотный, череда трёхраздельная (*Bidens tripartita* L.), вахта трёхлистная, багульник болотный, кубышка жёлтая (*Nuphar lutea* (L.) Sm.), купальница европейская (*Trollius europaeus* L.), а также весьма уникальные – белозор болотный (*Parnassia palustris* L.) и росянка круглолистная (*Drosera rotundifolia* L.). Правда, по сравнению с исходным состоянием, площадь современного их присутствия в общем фитоценозе агроландшафта незначительна и не превышает 1,5–3,0 га. Наибольшим спросом у заготовительных организаций и населения пользуются крапива двудомная, Иван-чай узколистый, змеевик большой, щавель конский,

багульник болотный, сабельник болотный, плаун булавовидный, пижма обыкновенная, клевер луговой и овёс посевной. Стоимость лекарственной биомассы в границах всего агроландшафта приближается к 1,5 млн руб.

Охотничье-промысловые ресурсы. В естественном состоянии болотные природные комплексы являются местообитанием богатейшей водной и околоводной фауны. Однако, в процессе осушения и последующей торфодобычи, подавляющее большинство видов болотной фауны вынуждено мигрировать на смежные территории. Спустя 100 лет, облик бывшего болота кардинально изменился. В структуре современного лесолугового постболотного агроландшафта 50 % занимают сеянные луга и пастбища, 25 % – искусственные и естественные лесопосадки, 22 % – пашня и около 3% – водная поверхность мелиоративных каналов и пожарных водоёмов. Такая конструкция с хорошо развитым экологическим каркасом в условиях низкого производственного агрофона, как оказалось, является идеальной средой обитания для многих охотничье-промысловых видов. Исследования показали, что, несмотря на кажущийся высокий фактор беспокойства, плотность группировки бобра обыкновенного (*Castor fiber*) на территории агроландшафта достигает 20–30 особей на 1000 га, зайца-беляка (*Lepus timidus*) – 48, ондатры (*Ondatra zibethicus*) – до 64 особей [25]. Наиболее привлекательными для воспроизводства, кормления и отдыха водоплавающих куликов (*Charadrii*), чибисов (*Vanellus vanellus*), тетеревов (*Lyrurus tetrix*), рябчиков (*Tetrastes bonasia*) и зайцев-беляков отмечены семенные травостой многолетних трав и выведенные из-за переувлажнения участки пашни. Посевы ячменя обыкновенного (*Hordeum vulgare* L.), овса посевного, гороха посевного (*Pisum sativum* L.) и кукурузы обыкновенной (*Zea mays* L.) активно используются тетеревами, кряквами (*Anas platyrhynchos*), кабаном (*Sus scrofa*), а озимые в осенний период – лосями (*Alces alces*). Лесопокрываемая территория – постоянные места обитания лоса, кабана, зайца-беляка, рыжей лисицы (*Vulpes vulpes*), енотовидной собаки (*Nyctereutes procyonoides*), барсука (*Meles meles*), горностае (*Mustela erminea*), куницы лесной (*Martes martes*), норки европейской (*Mustela lutreola*), настоящих уток (*Anatinae*) и тетеревов. Мелиоративные каналы и водоёмы – своеобразная среда для околоводных животных, так как их берега пригодны для сооружения нор и хаток. Наличие осины обыкновенной (*Populus tremula* L.), ивы

козьей (*Salix caprea* L.) и водной растительности обеспечивает условия для кормления ондатры, бобра и настоящих уток. По результатам учёта, только постоянно живущих промысловых видов в границах агроландшафта насчитывается более 27.

Кроме эстетически-промысловых функций, многие представители фауны, например, ондатры, обитающие в каналах, могут играть роль индикаторов различных изменений в агроландшафте и биогеоценозе в целом. По изменению численности и своему физиологическому состоянию эти и другие биологические «контролеры» позволяют оперативно судить об экологической чистоте технологий в земледелии и лесоводстве, а также о благополучии почвенных процессов.

Охотничье-промысловая продукция также имеет определённую стоимость. С учётом меняющихся цен, примерная (расчётная) её величина со всей территории агроландшафта составляет около 300–500 тыс. руб.

Лесные ресурсы. До осушения болотные ландшафты чаще всего входили в земли Гослесфонда. Поэтому, на некоторых торфомассивах после завершения фрезерной торфодобычи производится посадка вторичных, преимущественно хвойных, лесов. Однако, на практике это осуществляется без необходимого почвенно-мелиоративного обследования, без учёта степени сработки залежи и состояния водного режима. В результате значительная часть высаженных культур не приживается, либо в дальнейшем не даёт ожидаемого объёма товарной древесины.

Между тем, многолетние наблюдения [26] показывают, что под вторичное лесовосстановление больше других участков подходят торфянисто-глеевые, а ещё лучше полностью сработанные, хорошо осушенные участки. В этом случае, уже через 40–60 лет еловые или сосновые посадки вместе с внедряющимися на поздних стадиях ивой, осинкой и берёзой образуют полноразвитый многоярусный древостой с запасами товарной древесины 400–600 м³/га. Лесные культуры размещают в форме обособленных участков площадью 5–100 га и полезащитных полос шириной 5–10 м. Последние высаживают на одной из сторон мелиоративных каналов, где минеральный грунт перемешан с торфом. Значительную часть лесопокрытой площади занимают самовозобновляющиеся древостои смешанного типа из берёзы повислой (*Betula pendula* Roth.), осины обыкновенной, ивы козьей, сосны обыкновенной и ели сибирской (*Picea obovata* Ledeb.). Общая площадь искус-

ственного и естественного лесовосстановления торфомассива «Гадовское» вместе с сохранившимся по его периметру коренным лесным поясом составляет около 700 га. Условная товарная стоимость древесины с этой территории составляет около 15–30 млн руб. При оценке древесной массы как товара, необходимо отметить, что именно хвойно-лиственные лесные фитоценозы являются наиболее значимым местообитанием для ранее отмеченных биоресурсов изучаемого агроландшафта.

Заключение

Большая часть изученного агроландшафта в течение нескольких десятилетий используется в кормопроизводстве для возделывания однолетних, многолетних трав и зернофуражных культур. Для сравнения хозяйственной значимости различных видов природопользования, приводим результаты сельскохозяйственной деятельности на этой территории. Установлено, что в ценах 2020–2022 гг. стоимость произведённой продукции с 1 га сельскохозяйственных угодий составляет около 40–45 тыс. руб. В пересчёте на всю эксплуатационную площадь (1700 га) она может ежегодно достигать до 40–50 млн руб.

Таким образом, исходя из особенностей постболотных лесолуговых агроландшафтов, природные (непроизводственные) биоресурсы, безопасно извлекаемые из экосистем, в денежном эквиваленте могут составлять достойную альтернативу сельскохозяйственной деятельности, а по экологической значимости и многократно её превосходить.

Литература

1. Уланов Н.А., Уланов А.Н., Одинцова Ю.А. Ягодные и плодовые ресурсы лесолуговых постболотных агроландшафтов // Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов: материалы национальной конф. с междунар. участием, в рамках XI Междунар. науч.-практ. конф. «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии». Молодёжный: Иркутский ГАУ им. А.А. Ежовского, 2022. С. 312–317.
2. Уланов Н.А., Уланов А.Н. Лесолуговые постболотные агроландшафты как среда обитания для лекарственных растений // Охрана и рациональное использование животных и растительных ресурсов: материалы Междунар. науч.-практ. конф., приуроченной к 120-летию со дня рождения проф. В.Н. Скалона, в рамках XII Междунар. науч.-практ. конф. «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии». Молодёжный: Иркутский ГАУ им. А.А. Ежовского, 2023. С. 295–303.

3. Уланов А.Н., Смирнова А.В., Уланов Н.А. Формирование древостоев на выработанных торфяных болотах Северо-востока Европейской части России // Лесоведение. 2023. № 4. С. 379–387. doi: 10.31857/S0024114823040137
4. Уланов А.Н. Торфяные и выработанные почвы южной тайги Евро-Северо-Востока России. Киров: ОАО «Дом печати – Вятка», 2005. 320 с.
5. Инишева Л.И. Болотоведение. Томск: Томский гос. пед. ун-т, 2009. 210 с.
6. Инишева Л.И., Маслов Б.С. Растения на болотах. Томск: Томский ГПУ, 2015. 28 с.
7. Гордеева Е.М., Ведерникова И.Е. Лесоклиматические проекты в России: актуальное правовое обеспечение // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 209–215. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-209-215
8. Degteva S.V., Dubrovskiy Yu.A., Dulin M.V., Zheleznova G.V., Kaney V.A., Kirillov D.V., Kosolapov D.A., Kudreavtzeva D.I., Palamarchuk M.A., Pystina T.N., Semenova N.A., Shubina T.P. Rare species of plants and fungi in the “Koigorodskiy” National Park (Komi Republic, Russia) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 49–57. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-049-057
9. Еликов А.В., Цапков П.И., Карпова Е.М., Локтев Д.Б., Козвонин В.А., Шмакова Л.Н. Влияние высушенных ягод голубики и обогащённых ими продуктов питания на показатели метаболизма при интоксикации тетрахлорметаном // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 70–76. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-070-076
10. Летковский С.Т. Луговое хозяйство и агротехника зерновых культур на торфяниках. Киров: Краев. изд-во, 1936. 72 с.
11. Кузякин В.А., Челинцев Н.Г., Ломанов И.К. Методические указания по организации, проведению и обработке данных зимнего маршрутного учёта охотничьих животных в РСФСР. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР, 1990. 29 с.
12. Борисов Б.П. Методические указания по проведению всероссийских учётов ондатры. М., 1987. 28 с.
13. Кузякин В.А. Методические указания по осеннему маршрутному учёту численности боровой и полевой дичи. М.: ЦНИЛ Главохоты РСФСР, 1980. 19 с.
14. Егошина Т.Л., Жириков А.С., Кириллов Д.В., Лугинина Е.А., Сулейманова В.Н., Чиркова Н.Ю., Ярославцев А.В., Абдурахманова-Павлова М.В., Гинеев А.М., Мергасова Л.Я., Соловей А.А., Фёдоров В.Г. Мониторинг состояния ресурсов дикорастущих пищевых растений и грибов в России (2006–2009 гг.) для их рационального использования. Киров: ВНИИОЗ Россельхозакадемии, 2010. 122 с.
15. Раменский Л.Г. Проблемы и методы изучения растительного покрова. Л.: Наука, 1971. 334 с.
16. Цаценкин И.А., Дмитриева С.И., Беляева Н.В., Савченко И.В. Методические указания по экологической оценке кормовых угодий лесостепной и степной зон Сибири по растительному покрову. М.: Всесоюз. науч.-исслед. ин-т кормов, 1974. 248 с.
17. Васильков Б.П. Методы учёта съедобных грибов в лесах СССР. Л.: Наука, 1968. 68 с.
18. Скрыбина А.А. Методы ресурсной характеристики съедобных грибов // Проблемы региональной экологии: материалы II Всеросс. конф. Вып. 8. Томск: СО РАН, 2000. С. 111–113.
19. Черкасов А.Ф. Метод расчёта запасов съедобных грибов по материалам лесоустройства // Вопросы лесного охотоведения и побочных пользований: сб. науч. трудов. Пушкино: ВНИИЛМ, 1986. С. 90–96.
20. Егорова Н.Ю., Сулейманова В.Н. Изучение внутривидовой изменчивости природных популяций клюквы болотной (*Oxycoccus palustris* Pers.) в Кировской области // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. науч. трудов: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию Кировской лугоболотной опытной станции. М.: ООО «Угрешская типография», 2018. С. 269–272.
21. Кислицина А.В. Урожайность некоторых дикорастущих ягод на сфагновых болотах // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. науч. трудов: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию Кировской лугоболотной опытной станции. М.: ООО «Угрешская типография», 2018. С. 273–277.
22. Кузмичева Н.А. Голубика болотная как перспективное лекарственное растение // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. науч. трудов: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию Кировской лугоболотной опытной станции. М.: ООО «Угрешская типография», 2018. С. 250–253.
23. Яковлев А.П., Рупасова Ж.А., Антохина С.П., Савосько И.В., Белый П.Н., Гончарова Л.В., Василевская Т.И., Коломиец Э.И., Алещенкова З.М., Карбанович Т.М. Влияние удобрений на формирование генеративной сферы растений клюквы крупноплодной на рекультивируемом торфяном месторождении верхового типа // Природные ресурсы. 2021. № 2. С. 59–66.
24. Метелёв Н.Д. Фенологические фазы развития болотных ягодных культур на торфомассиве «Гадовское» в Оричевском районе Кировской области // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. науч. трудов: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию Кировской лугоболотной опытной станции. М.: ООО «Угрешская типография», 2018. С. 261–268.
25. Метелёв Н.Д. Современное состояние охотничьих ресурсов на территории выработанного торфомассива «Гадовское» в Оричевском районе Кировской области // Многофункциональное адаптивное кормопроизводство: сб. науч. трудов: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящённой 100-летию Кировской лугоболотной опытной станции. М.: ООО «Угрешская типография», 2018. С. 237–245.
26. Уланов А.Н. Агроэкологическая и биоресурсная оценка постболотных агроландшафтов // Болота и биосфера: материалы Всеросс. с междунар. участием

X школы молодых учёных. Тверь: ООО «Наукоёмкие технологии», 2018. С. 102–106.

References

1. Ulanov N.A., Ulanov A.N., Odintsova Y.A. Berry and fruit resources of forest-meadow post-swamp agrolandscapes // Protection and rational use of animal and plant resources: materialy natsionalnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, v ramkakh XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Klimat, ekologiya, selskoe khozyaystvo Evrazii”. Molodyozhnyy: Irkutskiy GAU im. A.A. Ezhevskogo, 2022. P. 312–317 (in Russian).
2. Ulanov N.A., Ulanov A.N. Forest-meadow post-swamp agrolandscapes as a habitat for medicinal plants // Protection and rational use of animal and plant resources: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoy k 120-letiyu so dnya rozhdeniya professora V.N. Skalona, v ramkakh XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii “Klimat, ekologiya, selskoe khozyaystvo Evrazii”. Molodyozhnyy: Irkutskiy GAU im. A.A. Ezhevskogo, 2023. P. 295–303 (in Russian).
3. Ulanov A.N., Smirnova A.V., Ulanov N.A. Forest stands formation on exhausted peat bogs in the north-east of the European part of Russia // Lesovedenie. 2023. No. 4. P. 379–387 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114823040137
4. Ulanov A.N. Peaty and depleted soils of the southern taiga in the Euro-North-East of Russia. Kirov: “Dom pechati – Vyatka” JSC, 2005. 320 p (in Russian).
5. Inisheva L.I. Swamp management. Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet, 2009. 210 p. (in Russian).
6. Inisheva L.I., Maslov B.S. Plants in swamps. Tomsk: Tomskiy GPU, 2015. 28 p. (in Russian).
7. Gordeeva Y.M., Vedernikova I.E. Forest carbon offsets in Russia: current legal infrastructure // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 209–215 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-209-215
8. Degteva S.V., Dubrovskiy Yu.A., Dulin M.V., Zheleznova G.V., Kanev V.A., Kirillov D.V., Kosolapov D.A., Kudreavtzeva D.I., Palamarchuk M.A., Pystina T.N., Semenova N.A., Shubina T.P. Rare species of plants and fungi in the “Koigorodskiy” National Park (Komi Republic, Russia) // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 49–57. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-049-057
9. Elikov A.V., Tsapok P.I., Karpova E.M., Loktev D.B., Kozvonin V.A., Shmakova L.N. The effect of dried blueberries and food products enriched with them on metabolic parameters of carbon tetrachloride intoxication // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 70–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-070-076
10. Letkovskiy S.T. Meadow farming and grain crops agrotechnics on peat bogs. Kirov: Kraevoe izdatelstvo, 1936. 72 p. (in Russian).
11. Kuz'yakin V.A., Chelintsev N.G., Lomanov I.K. Methodological guidelines for the organization, conduct and processing of winter route accounting of hunting animals in the RSFSR. Moskva: TsNIL Glavokhoty RSFSR, 1990. 29 p. (in Russian).
12. Borisov B.P. Methodological guidelines for conducting All-Russian muskrat description. Moskva, 1987. 28 p. (in Russian).
13. Kuz'yakin V.A. Methodological guidelines for the autumn route accounting of the number of upland game and field game. Moskva: TsNIL Glavokhoty RSFSR, 1980. 19 p. (in Russian).
14. Egoshina T.L., Zhiryakov A.S., Kirillov D.V., Luginina E.A., Suleymanova V.N., Chirkova N.Yu., Yaroslavtsev A.V., Abdurakhmanova-Pavlova M.V., Gineev A.M., Mergasova L.Ya., Solovey A.A., Fedorov V.G. Monitoring of wild food plant and mushroom resources in Russia (2006–2009) for their rational use. Kirov: VNIIOZ Rosselkhozakademii, 2010. 122 p. (in Russian).
15. Ramenskiy L.G. Problems and methods of vegetation cover studying. Leningrad: Nauka, 1971. 334 p. (in Russian).
16. Tsatsenkin I.A., Dmitrieva S.I., Belyaeva N.V., Savchenko I.V. Methodological guidelines for the ecological assessment of forage lands in the forest-steppe and steppe zones of Siberia by vegetation cover. Moskva: Vsesoyuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut kormov, 1974. 248 p. (in Russian).
17. Vasilkov B.P. Methods for accounting for edible mushrooms in the USSR forests. Leningrad: Nauka, 1968. 68 p. (in Russian).
18. Scryabina A.A. Methods of resource characteristics of edible mushrooms // Problems of regional ecology: materialy II Vserossiyskoy konferentsii. V. 8. Tomsk: SO RAN, 2000. P. 111–113 (in Russian).
19. Cherkasov A.F. Method for calculating stocks of edible mushrooms based on forest management materials // Questions of forest hunting and side uses: a collection of scientific papers. Pushkino: VNIILM, 1986. P. 90–96 (in Russian).
20. Egorova N.Yu., Suleymanova V.N. Study of intraspecific variability of cranberry (*Oxycoccus palustris* Pers.) natural populations in Kirov Oblast // Multifunctional adaptive feed production: sbornik nauchnykh trudov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 100-letiyu Kirovskoy lugobolotnoy opytной stantsii. Moskva: Ugreshskaya tipografiya, 2018. P. 269–272 (in Russian).
21. Kislitsyna A.V. The yield of some wild berries on sphagnum bogs // Multifunctional adaptive feed production: sbornik nauchnykh trudov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 100-letiyu Kirovskoy lugobolotnoy opytной stantsii. Moskva: Ugreshskaya tipografiya, 2018. P. 273–277 (in Russian).
22. Kuzmicheva N.A. Blueberry swamp as a promising medicinal plant // Multifunctional adaptive feed production: sbornik nauchnykh trudov: materialy Mezhdunarod-

noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 100-letiyu Kirovskoy lugobolotnoy opytnoy stantsii. Moskva: Ugreshskaya tipografiya, 2018. P. 250–253 (in Russian).

23. Yakovlev A.P., Rupasova Zh.A., Antohina S.P., Savosko I.V., Bely P.N., Goncharova L.V., Vasileuskaya T.I., Kolomiets E.I., Aleshchenkova Z.M., Karbanovich T.M. Influence of fertilizers on formation of generative sphere of cranberry plants on the recultivated developed peat deposit of high type // Natural resources. 2024. No. 2. P. 59–66 (in Russian).

24. Metelev N.D. Phenological phases of marsh berry crops development in the Gadovskoye peat bog in Oricheskiy district, Kirov Oblast // Multifunctional adaptive feed production: sbornik nauchnykh trudov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii,

posvyashchyonnoy 100-letiyu Kirovskoy lugobolotnoy opytnoy stantsii. Moskva: Ugreshskaya tipografiya, 2018. P. 261–268 (in Russian).

25. Metelev N.D. The current state of hunting resources on the territory of the Gadovskoye depleted peat bog in Oricheskiy district, Kirov Oblast // Multifunctional adaptive feed production: sbornik nauchnykh trudov: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 100-letiyu Kirovskoy lugobolotnoy opytnoy stantsii. Moskva: Ugreshskaya tipografiya, 2018. P. 237–245 (in Russian).

26. Ulanov A.N. Agro-ecological and bio-resource assessment of post-bog agrolandscapes // Swamps and the biosphere: materialy Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem X shkoly molodykh uchenykh. Tver: Naukoemkie tekhnologii, 2018. P. 102–106 (in Russian).

Сравнительная характеристика разнообразия фауны водораздельных озёр центральной части Большеземельской тундры

© 2026. В. И. Пономарёв¹, к. б. н., зав. отделом,
О. А. Лоскутова¹, к. б. н., с. н. с., О. Н. Кононова¹, к. б. н., н. с.,
Т. А. Кондратьева², к. б. н., гидробиолог,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды
Республики Татарстан,
420021, Россия, г. Казань, ул. Заводская, д. 3,
e-mail: ponomarev@ib.komisc.ru

Выполнены исследования фауны ледниковых озёр центральной части Большеземельской тундры из бассейнов рек Море-Ю и Адзва. В фауне водных беспозвоночных в бассейне р. Море-Ю установлен 61 таксон планктонных организмов и 28 групп зообентоса, на водосборе р. Адзва – 51 таксон и 20 групп соответственно. Рыбное население насчитывает 15 видов, из них 10 – в бассейне р. Море-Ю, и все 15 видов – на водосборе р. Адзва. Состав фаун зоопланктона и донных беспозвоночных на водоразделе рек Адзва и Море-Ю имеет сходные черты. В бассейне р. Море-Ю отсутствуют бореальные равнинные виды рыб: язь, плотва и окунь. Выдвинуто предположение, что выявленное отсутствие в бассейне р. Море-Ю бореальных равнинных видов язя, плотвы и окуня обусловлено не столько климатическими условиями, сколько историей оледенений и наличием водораздельных барьеров между бассейнами р. Море-Ю и тундровых притоков р. Уса.

Ключевые слова: водная фауна, зоопланктон, зообентос, рыбное население, озёра, Большеземельская тундра, история оледенений.

Comparative study of the Bolshezemelskaya tundra central part watershed lakes fauna diversity

© 2026. V. I. Ponomarev¹ ORCID: 0000-0002-0863-736X, O. A. Loskutova¹ ORCID: 0000-0002-9059-2745,
O. N. Kononova¹ ORCID: 0000-0002-7320-4034, T. A. Kondratjeva² ORCID: 0000-0002-8800-9098

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring
of the Republic of Tatarstan,
3, Zavodskaya St., Kazan, Russia, 420021,
e-mail: ponomarev@ib.komisc.ru

Studies of the fauna of the watershed glacial lakes in the central part of the Bolshezemelskaya tundra have been carried out. A comparative analysis of the zooplankton, zoobenthos and fish diversity and structure from the More-Yu and the Adzva river basins is given. The More-Yu River flows directly into the Barents Sea, and the Adzva River is the Pechora River tributary of the second order. 78 taxa of planktonic organisms were identified, including 61 species, one subspecies, and 16 taxa designated to the rank above the species. The zoobenthos in the lakes of the More-Yu River basin includes 28 groups of invertebrates, and 20 groups in the watershed of the Adzva River. The composition of the fauna of zooplankton and benthic invertebrates has significant similarities in the watershed of the Adzva and More-Yu rivers, which is due to the common physical and geographical conditions. Compared to fish, invertebrates have certain strategic opportunities to overcome intracontinental geographical barriers. Fish are unable to spread across watersheds from one aquatic system to another, having fundamentally different mechanisms of fauna formation than invertebrates. The fish population of the studied watershed lakes includes 15 species, 10 of which are in the More-Yu River basin, and all 15

species are in the Adzva River catchment area. There are no boreal lowland fish species in the More-Yu River basin, in particular *Leuciscus idus*, *Rutilus rutilus*, and *Perca fluviatilis*. It is suggested that the revealed absence of the above is not so much due to climatic conditions as to the history of glaciations and the presence of watershed barriers between the More-Yu River basin and the tundra tributaries of the Usa River.

Keywords: aquatic fauna, zooplankton, zoobenthos, fish population, lakes, Bolshezemelskaya tundra, the history of glaciations.

Несмотря на довольно продолжительную историю исследований водных биологических ресурсов Большеземельской тундры, начатых ещё в середине XVIII века, в литературе крайне мало ретроспективных сведений по этому вопросу [1–8]. В настоящее время детально изучена фауна отдельных озёрно-речных систем восточной (Вашуткины, Падимейские и Харбейские озёра), западной (оз. Веякоты и ряда других водоёмов бассейна р. Колвы) и северной (Наульто и Бол. Торавей) частей Большеземельской тундры [9–14].

Центральная область Большеземельской тундры, включающая густую гидрографическую сеть бассейнов правых притоков р. Усы и водотоков, напрямую впадающих в Баренцево море, изучена слабо. При этом такие сведения весьма актуальны, прежде всего, в связи с продолжающимся широкомасштабным вовлечением рассматриваемой территории в промышленное освоение месторождений углеводородного сырья.

Хорошо известна зависимость пространственной структуры сообществ водных беспозвоночных и позвоночных организмов от наличия географических препятствий расселению [15]. Всё это позволяет рассматривать северную и центральную часть Большеземельской тундры и, в частности, водораздельные озёра бассейнов рек Море-Ю и Адзва (правый приток р. Усы) как удобную модель для изучения закономерностей формирования фауны исторически молодых водоёмов на фоне регулярных ледниковых явлений [16, 17] и в условиях наличия географических барьеров.

Цель настоящей работы – провести сравнительное изучение разнообразия современной фауны планктонных и бентосных беспозвоночных и рыб ледниковых озёр бассейнов рек Море-Ю и Адзвы в районе их водораздела в связи с ледниковой историей региона.

Материал и методы исследований

Полевые сборы выполнили в 1998, 2001, 2004, 2017, 2019, 2021–2023 гг. в бассейнах рек Море-Ю, напрямую впадающей в Хайпудырскую губу Баренцева моря, и Хоседаю – правого притока р. Адзвы, водосбор

р. Печоры (рис. 1). Общая характеристика изученных озёр дана в таблице. Измерения глубины озёр осуществляли эхолотом «Wide 3D View» (Techsonic industries INC., США). Определение географических координат мест отбора проб вели при помощи приёмника GPS-12 («Garmin», США). Электропроводность и pH измеряли с использованием портативного полевого многоканального измерителя Cond 330i/SET (WTW, Германия).

Отбор проб зоопланктона осуществляли посредством фильтрации 50 л воды через сеть

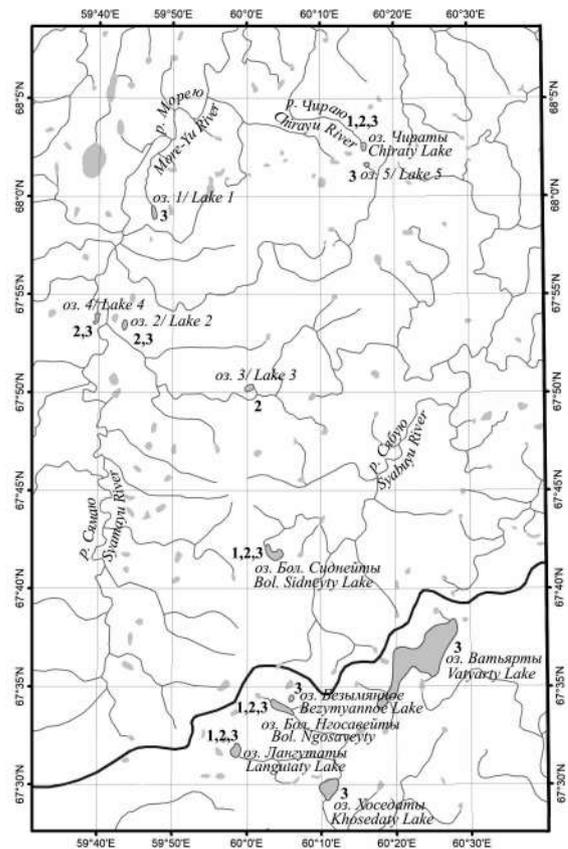


Рис. 1. Локализация исследованных озёр. *Примечание:* линия на рисунке обозначает прохождение водораздела бассейнов рек Море-Ю и Адзвы. Цифрами отмечены места отбора проб зоопланктона (1), зообентоса (2); икhtiологических исследований (3)

Fig. 1. Location of the studied lakes. *Note:* the line indicates the passage of the watershed of the More-Yu and Adzva river basins. The numbers indicate the sampling sites of zooplankton (1), zoobenthos (2), ichthyological studies (3)

Таблица / Table

Общая характеристика изученных озёр / General characteristics of the studied lakes

№	Название или нумерация Name or conventional numbering	Условные обозначения Symbols	Географические координаты Geographical coordinates	Период работ Work period	Высота над уровнем моря, м Height above sea level, m	Площадь, га Area, ha	Максимальная глубина, м Maximum depth, m	Субстрат Substrate	pH	Электропроводность, мS/cm Electrical conductivity, mS/cm
Бассейн р. Адзья / Adzva River Basin										
1	Хоседаты Khosedaty	H	N 67°29'59" E 60° 11'35"	07.2000	104	259	22	Песок, ил Sand, silt	8,60	0,030
2	Лангутаты Langutaty	L	N 67°31'57" E 59°58'53"	09.2019	114	271	3	Песок, валуны, ил Sand, boulders, silt	7,21	0,008
3	Бол. Нгосавейты Bol. Ngosaveuty	BN	N 67°34'03" E 60°05'25"	09.2021	110	140	11	Ил, галька Silt, pebbles	6,93	0,022
4	Безьянное Bezuyannoe	Bez	N 67°34'29" E 60°06'13"	09.2021	115	30	5,5	Ил / silt	6,45	0,021
5	Ватьярты Vatyarty	Vat	N 67°36'60" E 60°24'16"	08.2001	119	2360	15	Песок, валуны, ил Sand, boulders, silt	–	–
Бассейн р. Море-Ю / More-Yu River Basin										
1	Бол. Сиднейты Bol. Sydneyty	BS	N 67°42'03" E 60°03'49"	09.2022	92,4	213	16	Ил / Silt	6,78	0,020
2	Озеро 1 / Lake 1	1	N 67°58'52" E 59°45'37"	07.2004	13,5	46	8,5	Песок, ил Sand, silt	7,51	0,026
3	Озеро 2 / Lake 2	2	N 67°53'12" E 59°44'01"	07.2001	22,9	26	3,5	Ил, галька Silt, pebbles	6,36	0,018
4	Озеро 3 / Lake 3	3	N 67°50'48" E 60°02'49"	08.1998	30	2	–	Ил, песок Silt, sand	7,20	0,015
5	Озеро 4 / Lake 4	4	E 67°53'49" N 59°40'21"	07.2001	19	36	14	Песок, валуны, ил Sand, boulders, silt	6,71	0,030
6	Чираты Chiraty	Ch	E 68°02'11" N 60°15'41"	07.2023	147	41	26	Песок, валуны, ил Sand, boulders, silt	7,46	0,010
7	Озеро 5 / Lake 5	5	E 68°01'31" N 60°16'54"	07.2023	112	12	2,5	Ил / Silt	6,94	0,015

Примечание: прочерк – нет данных.
Note: a dash means no data.

Апштейна (газ № 80) в прибрежье и в открытой части озёр (в поверхностном горизонте воды глубиной до 2 м). Пробы фиксировали 4 % раствором формальдегида. Камеральную обработку проб осуществляли в лабораторных условиях [18]. Индивидуальный вес организмов рассчитывали по формулам [19]. Всего в водоёмах бассейна р. Адзвы отобрано 15 проб, р. Море-Ю – 16. Наборы данных о составе планктонной фауны, лежащие в основе анализа, представленного в работе, хранятся в системе GBIF.

Сборы макрозообентоса производили на мягких грунтах облегчённым дночерпателем Петерсена (1/40 м²), на плотных грунтах – гидробиологическим скребком (длина лезвия 30 см, размер ячеек капронового сита – 0,16 мм). После промывки пробы фиксировали 4 % водным раствором формальдегида и обрабатывали стандартными методами [18]. Всего отобрано и обработано 49 проб зообентоса из 11 озёр (24 пробы из бассейна р. Адзвы и 25 – из бассейна р. Море-Ю).

Сбор ихтиологических материалов из 12 изученных озёр (табл., рис. 1), выполнили в соответствии с общепринятыми методами исследований [20]. Рыб отлавливали с использованием стандартного набора финских ставных жаберных лесковых сетей с ячейей 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм, длиной 30 м и высотой 1,8 м.

Сходство зообентоса озёр определяли с помощью коэффициента Съеренсена [21]. Для характеристики структурных показателей развития макрозообентоса рассчитывали численность, биомассу, частоту встречаемости таксона в группе озёр.

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2007, PAST 4.15 [22], программной среды R [23]. Для выполнения многомерного анализа данных методом главных координат (РСоА) в качестве экологической дистанции между объектами использовали расстояние Жаккара. Проверку статистической значимости достоверности различий планктонной и бентосной фаун между исследованными озёрами проводили при помощи перестановочного многомерного дисперсионного анализа PERMANOVA. Для анализа исходные данные по зообентосу преобразовали корнем 4-й степени. Метод PERMANOVA для зообентоса использовали на основе индекса Брея-Кёртиса с 9999 перестановками [22], для визуализации полученных данных использован метод неметрического многомерного шкалирования (NMDS).

Результаты и обсуждение

Общность физико-географических условий (суровый климат, наличие вечномерзлых толщ, избыточное увлажнение) способствует формированию весьма однородного гидрологического режима и химического состава озёрных вод [10]. Характерными особенностями озёр являются: высокое насыщение воды кислородом, близкая к нейтральной реакция среды, низкая минерализация, незначительное содержание азота, фосфора и органических веществ.

В этих условиях в составе зоопланктона всех исследованных водоёмов установлено 78 таксонов, включая 61 вид, один подвид и 16 таксонов, определённых до ранга выше вида. В планктонной фауне озёр бассейна р. Адзвы найден 51 таксон, в бассейне р. Море-Ю – 61. Коловратки составляли 51 % и 44 % соответственно. Бóльшим разнообразием среди них в озёрах Лангутаты и Бол. Нгосавейты отличались сем. Synchaetidae и Euchlanidae; в озёрах Бол. Сиднейты и Чираты – сем. Synchaetidae, Notommatidae и Lecanidae.

Максимальное видовое обилие планктонных животных отмечено в оз. Бол. Сиднейты (51), наименьшее – в оз. Чираты (31). Зоопланктон озёр, расположенных в бассейне р. Море-Ю, исследован впервые. Планктонные сообщества в них отличались относительно невысоким для водоёмов Большеземельской тундры видовым разнообразием [10, 24]. Среди найденных видов, коловратка *Lindia* (s. str.) *torulosa* Dujardin (оз. Чираты), впервые обнаружена на данной территории. В составе таксонов, найденных в зоопланктоне озёр, расположенных в бассейне р. Адзвы, были обнаружены новые виды и подвиды, отсутствующие в опубликованных списках [10, 24, 25] – это *Trichocerca* (*D.*) *tigris*, *Lecane intrasinuata* и *Trichotria pocillum* var. *bergi*. Причём последние два ранее были указаны как потенциально возможные обитатели водоёмов бассейна.

Анализ видовой структуры методом главных координат показал, что вне зависимости от принадлежности к тому или иному бассейну, таксономический состав зоопланктона в каждом из исследованных озёр отличался своеобразием ($F = 8,79, p < 0,0001$). Наибольшее различие от остальных водоёмов установлено для планктонной фауны в оз. Чираты (рис. 2).

В исследованных озёрах Большеземельской тундры выявили 28 таксономических

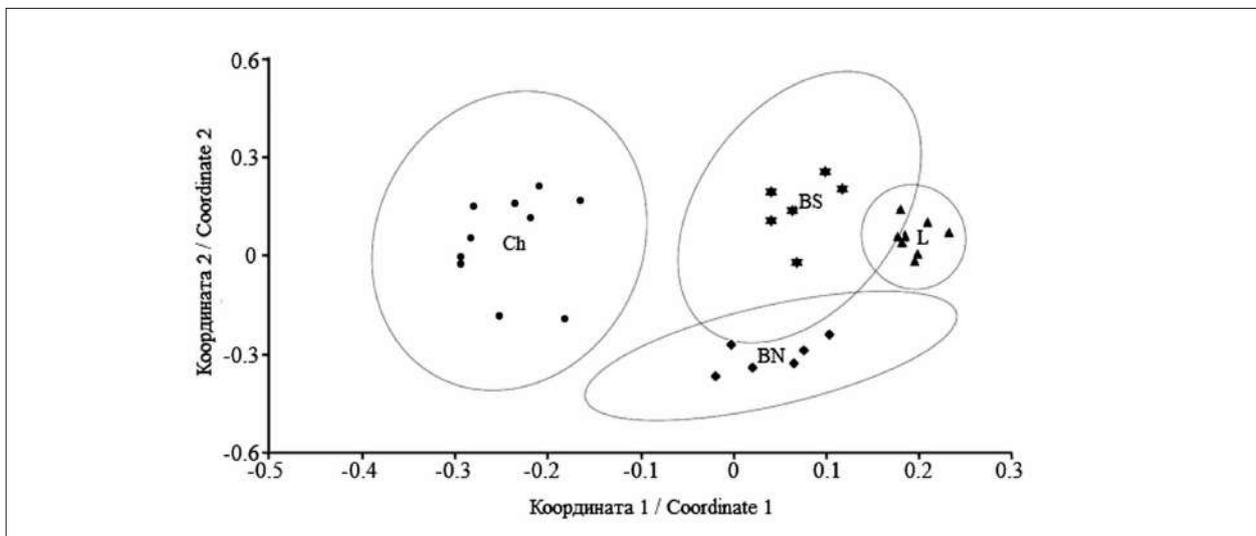


Рис. 2. Распределение таксономического состава зоопланктона исследованных озёр в пространстве двух первых координат. *Примечание: обозначения см. в таблице*
Fig. 2. Distribution of the zooplankton taxonomic composition in the studied lakes in the space of the first two coordinates. *Note: see the table for designations*

групп зообентоса. В озёрах бассейна р. Море-Ю зообентос включал все 28 групп беспозвоночных, в водоёмах бассейна р. Адзвы – 20 (не обнаружены *Turbellaria*, *Amphipoda*, *Anostraca*, *Araneina*, *Ephemeroptera*, *Megaloptera*, *Pediciidae*, *Dixidae*). По частоте встречаемости в бассейне р. Адзвы доминировали нематоды, олигохеты, веслоногие и ветвистоусые рачки, моллюски и хирономиды. Эти же группы беспозвоночных отличались высокой частотой встречаемости и в озёрах бассейна р. Море-Ю.

Установлено значительное сходство ведущей группы зообентоса – хирономид, между фаунами двух сравниваемых бассейнов, коэффициент сходства по Сьёренсену составил 0,7. Общий список хирономид включал 34 таксона, из них в озёрах бассейна р. Адзвы отмечено 18 таксонов, в водоёмах на водосборе р. Море-Ю – 20. Наибольшее число видов содержало подсемейство *Orthocladinae*. Из этого таксона в бассейне р. Адзвы наибольшим количеством видов (по три) представлены роды *Cricotopus*, *Psectrocladius* и *Eukiefferiella*. В бассейне р. Море-Ю род *Psectrocladius* включал четыре вида, а роды *Cricotopus* и *Eukiefferiella* – по два вида.

Наибольшей встречаемостью в озёрах обоих бассейнов отличались *Constempellina brevicosta* и *Tanytarsus excavatus* (71–88 %), при этом имелись и различия в фауне хирономид. В озёрах бассейна р. Адзвы часто встречался *Orthocladus (Pogonocladus) consobrinus*, а на водосборе р. Море-Ю во всех пробах обнаружен *Cryptochironomus (Cr.) defectus*. Более чем в половине проб присутствовали *Procladius*

(*Holot.*) *ferrugineus* и *Eukiefferiella coeruleascens*. Величина индексов Шеннона для хирономид оказалась сравнительно высокой. В бассейне р. Адзвы этот показатель варьировал от 2,05 до 2,44, в бассейне р. Море-Ю – 2,28–2,64.

Тест сходства PERMANOVA показал значимые различия видового состава зообентоса исследованных озёр бассейнов двух рек ($Df = 1, F = 2,2969, P\text{-value} = 0,026$). Визуализация полученных данных с использованием

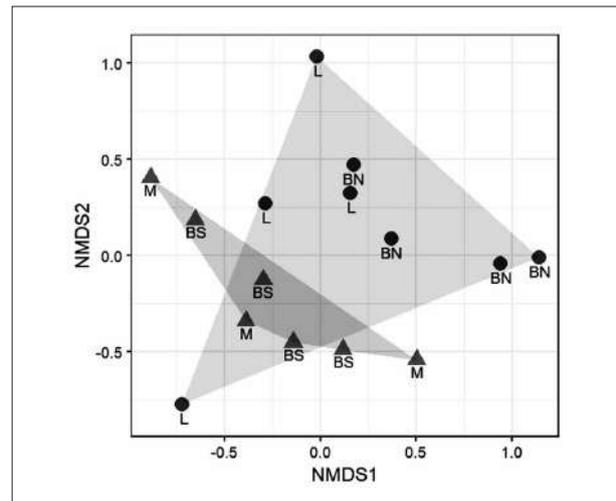


Рис. 3. Диаграмма ординации NMDS с использованием индекса сходства Брея-Кёртиса, показывающая несходство сообществ зообентоса озёр бассейнов рек Адзвы и Море-Ю. *Примечание: обозначения см. в таблице*
Fig. 3. NMDS ordination diagram using the Bray-Curtis similarity index showing the dissimilarity of zoobenthic communities in the lakes of the Adzva and More-Yu River Basins. *Note: see the table for designations*

метода неметрического многомерного шкалирования (NMDS) представлена на рисунке 3.

Зообентос исследованных озёр довольно разнообразен и характеризуется как значительным сходством, так и некоторыми различиями. Ранее в Вашуткиных озёрах не были обнаружены Phyllopora, из насекомых – Odonata и Megaloptera [10]. В данной работе эти группы также не отмечены в бассейне р. Адзвы, однако редко и в небольшом количестве Megaloptera встречались в составе зообентоса озёр бассейна р. Море-Ю. Стрекозы не обнаружены во всех исследованных озёрах. Листоногие раки в наших сборах отмечены лишь в водоёмах бассейна р. Море-Ю. В озёрах бассейна р. Адзвы, в отличие от расположенных на водосборе р. Море-Ю, наиболее массовое развитие получили ветвистоусые раки (Cladocera). Эта особенность отмечалась для озёр бассейна р. Адзвы и ранее [10]. Хируномиды, одна из доминирующих групп в составе зообентоса, весьма разнообразны, а общность их видового состава между двумя группами озёр составила 70 %.

Состав рыбного населения изученных озёр бассейнов рек Море-Ю и Адзвы включает

15 видов из 7 семейств: язь *Leuciscus idus*, обыкновенный голяк *Phoxinus phoxinus*, плотва *Rutilus rutilus*, щука *Esox lucius*, обыкновенный сиг *Coregonus lavaretus*, чир *C. nasus*, пелядь *C. peled*, сибирская ряпушка *C. sardinella*, нельма *Stenodus leucichthys*, европейский хариус *Thymallus thymallus*, налим *Lota lota*, колюшка девятииглая *Pungitius pungitius*, подкаменщик *Cottus gobio*, ёрш *Gimnocephalus cernuus* и речной окунь *Perca fluviatilis*. Все они одновременно встречались только в Вашуткиных озёрах, служащих истоком р. Адзвы [9]. В водоёмах бассейна её правого притока – р. Хоседаю – отметили 13 видов рыб (не встречены нельма и обыкновенный голяк). Особое внимание обращает отсутствие в озёрах на водосборе р. Море-Ю язя, плотвы, голяка, налима и окуня, зарегистрированных в бассейне р. Адзвы. При этом только в 2023 г. в озёрах 5 и Чираты обнаружен подкаменщик, которого ранее в бассейне р. Море-Ю не находили [26].

В рыбной части водных сообществ четырёх из шести изученных водосборных водоёмов бассейна р. Море-Ю доминировала пелядь, тогда как в оз. Бол. Сиднейты пелядь лишь

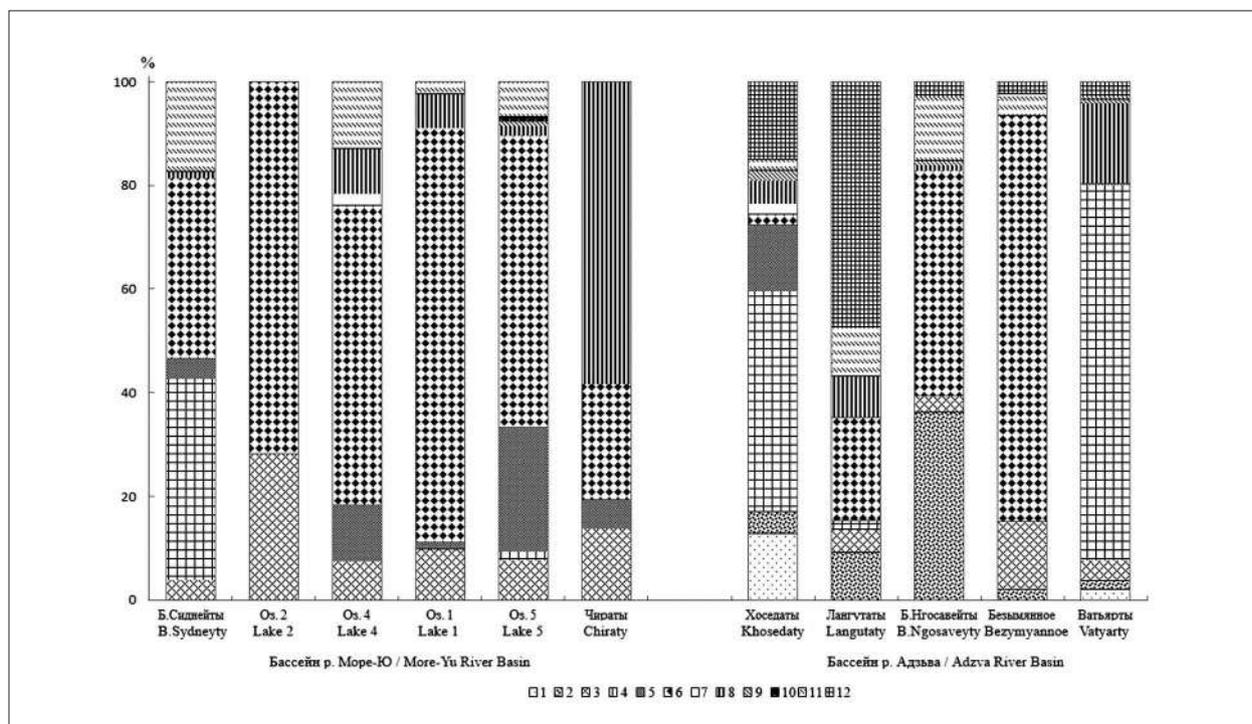


Рис. 4. Доля различных видов рыб в озёрах бассейнов рек Море-Ю и Адзвы.
Примечание: 1 – язь, 2 – плотва, 3 – обыкновенная щука, 4 – обыкновенный сиг, 5 – чир, 6 – пелядь, 7 – сибирская ряпушка, 8 – европейский хариус, 10 – подкаменщик, 11 – обыкновенный ёрш, 12 – речной окунь

Fig. 4. The proportion of different fish species in the lakes of the More-Yu and the Adzva River Basins.
Note: 1 – *Leuciscus idus*, 2 – *Rutilus rutilus*, 3 – *Esox lucius*, 4 – *Coregonus lavaretus*, 5 – *C. nasus*, 6 – *C. peled*, 7 – *C. sardinella*, 8 – *Thymallus thymallus*, 10 – *Cottus gobio*, 11 – *Gimnocephalus cernuus*, 12 – *Perca fluviatilis*

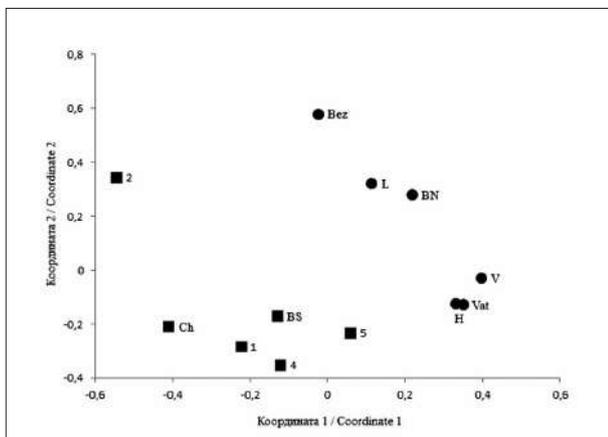


Рис. 5. Отображение сходства видового состава рыбного населения исследованных озёр по индексу Жаккара в плоскости главных координат.

Примечание: обозначения см. в таблице.

Круглый маркер – бас. р. Адзвы, квадратный – бас. р. Море-Ю

Fig. 5. The similarity of the fish species composition in the studied lakes by the Jaccard index in the plane of the principal coordinates.

Note: see the table for designations.

Round marker – the Adzva River Basin, square – the More-Yu River Basin

немногим уступила доле сига, а в оз. Чираты преобладал хариус (рис. 4). Это хорошо согласуется с современными представлениями о структуре пресноводной ихтиофауны Арктики, общий облик которой определяют лососёвые, сиговые и хариусовые [27].

Степень сходства и различий видового состава фауны рыб исследованных озёр по индексу Жаккара показана на рисунке 5. На нём отчетливо проявляются различия между озёрами бассейнов рек Море-Ю и Адзвы. При этом отмечается чёткая дифференциация водоёмов в пределах каждого из этих двух бассейнов. На водосборе первого водотока выделяется единственное обследованное термокарстовое озеро 2, населённое двумя видами рыб (пелядь и щука), тогда как остальные водоёмы проявляют весьма существенное сходство. В бассейне Адзвы резко отличаются две группы озёр: первая – Вашуткины, Ватъярты и Хоседаты (эти озёра примыкают непосредственно к рекам Адзве и Хоседаю) и вторая – Лангутаты, Бол. Нгосавейты и Безымянное озеро (эти водоёмы связаны с реками протяжёнными протоками).

Рыбное население озёр бассейна р. Море-Ю включает 10 видов, тогда как на водосборе р. Адзвы – 15. Отмечены значительное видовое сходство ядра рыбной части водного сообщества и преобладание сиговых рыб.

Особое внимание обращает отсутствие в бассейне р. Море-Ю представителей бореального равнинного ихтиофаунистического комплекса – язя, плотвы и окуня [28], населяющих соседние Вашуткины озёра [9] и водоёмы бассейна верховьев р. Колвы (наши неопубликованные данные). Ещё один бореальный равнинный вид – щука – весьма многочислен в водоёмах обоих бассейнов. В отличие от трёх отмеченных более теплолюбивых видов, щука нерестится сразу после распаления льда и при низкой температуре воды. Отсутствие в бассейнах ряда арктических рек плотвы и окуня ранее отметил Ю.И. Чернов [29], объяснявший этот феномен экстремальными условиями обитания в данном регионе.

Известно, что около 90–80 тыс. лет назад движение покровного ледника с шельфов Баренцева и Карского морей привело к блокированию стока северных рек [16]. Впоследствии покровные ледники не распространялись в регионе южнее 67 °с. ш. [30]. В бассейне р. Печоры оледенения занимали лишь наиболее северные участки бассейнов их притоков нижнего течения, в частности, р. Усы. Соответственно, участки водных систем южнее 67 °с. ш. могли служить рефугиумами, из которых фауна водных беспозвоночных и рыб получала возможность в периоды межледниковий распространяться на север, вплоть до водораздела печорского бассейна.

Таким образом, позднеплейстоценовые покровные оледенения целиком и неоднократно занимали территорию бассейна р. Море-Ю и лишь частично соседние водные системы рек Адзвы и Колвы, разделённые между собой водораздельными барьерами.

Водоразделы крупных речных систем представляют собой естественные преграды для расселения рыб и водных беспозвоночных, в том числе и за счёт экстремальных условий обитания, складывающихся в условиях высокогорья и высоких широт [28, 31, 32]. При этом для горных и тундровых водоёмов характерна специфическая фауна, не свойственная сопредельным территориям, своеобразие которой увеличивается с высотой над уровнем моря и географической широтой.

Можно предположить, что пути формирования фауны беспозвоночных и рыб сопредельных бассейнов, с северо-запада – р. Море-Ю, напрямую впадающей в Хайпудырскую губу Баренцева моря, с юго-востока – рек бассейна р. Усы существенно различаются. При этом выявленные различия структуры рыбного населения в большей сте-

пени обусловлены наличием водоразделов, в меньшей – особенностями климата. Удалённость линии водораздела между усинским и баренцевоморским водосборными бассейнами от морского побережья варьирует от 20–25 до 160–170 км. Столь же существенно варьирует северная граница распространения язя, плотвы и окуня, вне зависимости от различий климатических условий озёр, с одной стороны, расположенных в бассейнах рек, напрямую впадающих в северные моря, с другой стороны – относящихся к водосбору р. Печоры.

Известно, что в отличие от рыб, пресноводные беспозвоночные расселяются, используя разнообразные механизмы, которые делятся на активные и пассивные [33]. Активное расселение (полёт взрослых амфибиотических насекомых через промежуточные ландшафты) встречается относительно редко. Пассивное распространение может происходить при транспортировке беспозвоночных животными-переносчиками (рыбами, птицами), потоком воды или ветром.

По сравнению с рыбами беспозвоночные имеют определённые стратегические возможности для преодоления внутриконтинентальных географических барьеров. Рыбы не способны распространяться через водоразделы из одной водной системы в другую, имея принципиально иные, нежели беспозвоночные, механизмы формирования фаун. На основании полученных результатов сравнительного изучения разнообразия фауны водораздельных озёр Большеземельской тундры можно предположить, что послеледниковое происхождение пресноводной ихтиофауны бассейна р. Море-Ю не связано с её проникновением с юга, на что указывает отсутствие здесь язя, плотвы и окуня. Напротив, с большой долей вероятности заселение этого водосбора шло с северо-запада и, когда речь идёт о сиговых, с северо-востока. Дальнейшие популяционно-генетические исследования помогут приблизиться к пониманию этого вопроса.

Заключение

Таким образом, впервые получены данные о составе и структуре фаун беспозвоночных и рыб ряда озёр бассейнов рек Море-Ю и Адзвы. Обследованные водоёмы, расположенные на территории российской Арктики, представляют научный интерес не только в связи с их географическим расположением, особенностями формирования и становления на водоразделе крупных речных систем,

являющихся естественными преградами для расселения водной биоты, но и в историческом аспекте. Экстремальные погодные условия, характеризующиеся преимущественно низкими температурами и коротким вегетационным периодом, способствовали формированию оригинальных по составу водных фаун в условиях ограниченных популяционных ресурсов. Общность физико-географических условий, определивших формирование весьма однородного гидрологического режима и химического состава озёрных вод, а также способность к расселению и миграции многих таксонов беспозвоночных обусловили сходство состава фауны зоопланктона и донных беспозвоночных исследованных озёр, а выявленные различия объясняются межгодовыми и сезонными изменениями развития фауны беспозвоночных.

Вместе с тем можно предположить, что особенности формирования рыбной части водных сообществ этих озёр, в частности, отсутствие в бассейне р. Море-Ю бореальных равнинных видов язя, плотвы и окуня обусловлены в большей мере не климатическими условиями, а историей оледенений и наличием водораздельных барьеров между бассейнами р. Море-Ю и тундровых притоков р. Усы.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Закономерности формирования, пространственно-структурной организации и динамики фауны и населения животных европейского северо-востока России и сопредельных арктических и бореальных территорий в изменяющихся условиях окружающей среды» (2025-2029 гг.) № 125013101229-9. Авторы благодарят А.Б. Захарова за любезно предоставленные материалы по составу рыбного населения оз. Ватъярты.

Литература

1. Друккер Г.Ф. Рыбный промысел Большеземельской тундры // Сборник научно-промысловых работ. Вып. 38. М.: Научно-техническое управление ВСНХ, 1927. С. 5–21.
2. Пробатов Н., Бируля А.А. Материалы по научно-промысловому обследованию Карской губы и реки Кары: материалы для изучения пищевого режима промысловых рыб низовьев реки Кары и Карской губы. М.: ВНИРО, 1934. 164 с.
3. Пробатов А.Н. Данные по систематике и биологии чира (*Coregonus nasus*) и сига (*Coregonus lavaretus pidschian*) реки Кары // Учен. Зап. Пермского гос. ун-та. 1936. Т. 2. № 1. С. 3–40.

4. Пробатов А.Н. К вопросу о происхождении пресноводных гольцов рода *Salvelinus* // Зоологический журнал. 1946. Т. 25. № 3. С. 277–280.
5. Световидов А.Н. Сиг рек Кары и Сибирчи (*Coregonus lavaretus pidschian natio bergiellus*) // Труды ЗИН АН СССР. 1936. Т. 4. № 2. С. 389–424.
6. Шеломов В.Н. К биологии нельмы *Stenodus leucichthys nelma* (Pallas) реки Коротайха // Учен. Зап. Пермского гос. ун-та. 1937. Т. 3. № 1. С. 125–161.
7. Есипов В.К. О пеляди (*Coregonus peled* Gmelin) из озёр Большеземельской тундры // Зоологический журнал 1938. Т. 17. № 2. С. 303–315.
8. Бурмакин Е.В. Биология и рыбохозяйственное значение пеляди // Труды Барабинского отд. ВНИОРХ. 1953. Т. 4. № 1. С. 25–80.
9. Сидоров Г.П. Рыбные ресурсы Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1974. 164 с.
10. Флора и фауна водоёмов европейского Севера (На примере озёр Большеземельской тундры) / Отв. ред. М.В. Гецен. Л.: Наука, 1978. 192 с.
11. Беляков В.П., Скворцов В.В. Макро- и мейобентос, их продукция // Особенности структуры экосистем озёр Крайнего Севера (на примере озёр Большеземельской тундры). СПб.: Наука, 1994. С. 183–202.
12. Шубин Ю.П., Сидоров Г.П. Рыбохозяйственная характеристика некоторых озёр северной части Большеземельской тундры // Некоторые подходы к организации экологического мониторинга в условиях Севера. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1996. С. 152–160.
13. Фефилова Е.Б., Батурина М.А., Кононова О.Н., Лоскутова О.А., Хохлова Л.Г., Дубовская О.П. Многолетние изменения в сообществах гидробионтов в Харбейских озёрах // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2014. Т. 7. № 3. С. 240–266.
14. Loskutova O.A., Baturina M.A. Macrozoobenthos communities in small tundra lakes of the European North-east of Russia // Inland Water Biol. 2022. V. 15. No. 6. P. 851–859. doi: 10.1134/S1995082922060128
15. Дзунино М., Дзуллини А. Биогеография (эволюционные аспекты). М.: Итало-Российский ин-т экологических исслед. и образования: Географический фак. МГУ, 2010. 317 с.
16. Mangerud J., Astakhov V.I., Murray A.S., Svendsen J.I. The chronology of a large ice-dammed lake and the Barents–Kara ice sheet advances, northern Russia // Global and Planetary Change. 2001. V. 31. No. 1. P. 321–336. doi: 10.1016/S0921-8181(01)00127-8
17. Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G.K.C., Henriksen M., Hjort C., Krinner G., Lunkka P., Möller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J.I. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the last glaciation // Quat. Sci. Rev. 2004. V. 23. P. 1313–1332. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.009
18. Методика изучения биогеоценозов внутренних водоёмов / Отв. ред. Ф.Д. Мордухай-Болтовской. М.: Наука, 1975. 240 с.
19. Кононова О.Н., Фефилова Е.Б. Методическое руководство по определению размерно-весовых характеристик организмов зоопланктона Европейского Севера России. Сыктывкар: ИБ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 152 с.
20. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.
21. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: в 2 кн. М.: Наука, 2005. Кн. 1. 281 с.
22. Hammer Ø., Harper D., Ryan P. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4.
23. Ringnér M. What is principal component analysis? // Nat. Biotechnol. 2008. V. 26. No. 3. P. 303–304. doi: 10.1038/nbt0308-303
24. Кононова О.Н., Дубовская О.П., Фефилова Е.Б. Зоо- и некрозоопланктон Харбейских озёр Большеземельской тундры (по исследованиям 2009–2012 годов) // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2014. Т. 7. № 3. С. 303–327.
25. Макарцева Е.С., Прилежаев И.Д. Зоопланктон и его продукция // Особенности структуры экосистем озёр Крайнего Севера (на примере озёр Большеземельской тундры). СПб.: Наука, 1994. С. 146–168.
26. Пономарёв В.И. Структура рыбного населения бассейна реки Море-Ю (бассейн Хайпудырской губы Баренцева моря) // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2023. № 6. С. 37–46. doi: 10.19110/1994-5655-2023-6-37-46
27. Решетников Ю.С. Ихтиофауна Арктики и её специфика // Успехи современной биологии. 2024. Т. 144. № 2. С. 234–244. doi: 10.31857/S0042132424020104
28. Никольский Г.В. Структура вида и закономерности изменчивости рыб. М.: Пищевая промышленность, 1980. 184 с.
29. Чернов Ю.И. Экология и биогеография. Избранные работы. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2008. 580 с.
30. Astakhov V.I., Svendsen J.I., Matiouchkov A., Mangerud A.N., Maslenikova O., Tveranger J. Marginal formations of the last Kara and Barents ice sheets in northern European Russia // Boreas. 1999. V. 28. No. 1. P. 23–45. doi: 10.1111/j.1502-3885.1999.tb00205.x
31. Alpine waters / Ed. U. Bindi. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. V. 6. 278 p.
32. Ponomarev V.I., Loskutova O.A., Kononova O.N. Structure of aquatic communities in mountain lakes of the Torgovaya River basin (Subpolar Urals) // Russ. J. Ecol. 2022. V. 53. P. 404–412. doi: 10.1134/S1067413622050101
33. Bilton D., Freeland J.R., Okamura B. Dispersal in freshwater invertebrates // Annu. Rev. Ecol. Syst. 2001. V. 32. P. 159–181. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114016

References

1. Drukker G.F. Fishing industry in Bolshezemelskaya tundra // Collection of scientific and commercial papers. V. 38. Moskva.: Nauchno-tehnicheskoe upravlenie VSNKh, 1927. P. 5–21 (in Russian).
2. Probatov N., Birulya A.A. Materials on scientific and commercial survey of the Kara Bay and the Kara River: materials for studying the nutritional regime of commercial fish of the lower reaches of the Kara River and the Kara Bay. Moskva: VNIRO, 1934. 164 p. (in Russian).
3. Probatov A.N. Data on taxonomy and biology of broad whitefish (*Coregonus nasus* Pall.) and humpback whitefish (*Coregonus lavaretus pidschian* G.) of the Kara River // Uchenye zapiski Permskogo gosudarstvennogo universiteta. 1936. V. 2. No. 1. P. 3–40 (in Russian).
4. Probatov A.N. On the issue of the origin of freshwater char of the genus *Salvelinus* // Zoologicheskii zhurnal. 1946. V. 25. No. 3. P. 277–280 (in Russian).
5. Svetovidov A.N. The whitefish of Kara and Sibircha Rivers (*Coregonus lavaretus pidschian natio bergiellus*) // Proceedings of the Zoological institute of the USSR Academy of Sciences. 1936. V. 4. No. 2. P. 389–424 (in Russian).
6. Shelomov V.N. On the biology of nelma *Stenodus leucichthys nelma* (Pallas) of the Korotaikha River // Uchenye zapiski Permskogo gosudarstvennogo universiteta. 1937. V. 3. No. 1. P. 125–161 (in Russian).
7. Esipov V.K. On the peled (*Coregonus peled* Gmelin) from the lakes of the Bolshezemelskaya tundra // Zoologicheskii zhurnal. 1938. V. 17. No. 2. P. 303–315 (in Russian).
8. Burmakin E.V. Biology and fisheries importance of peled // Trudy Barabinskogo otdeleniya VNIORKh. 1953. V. 4. No. 1. P. 25–80 (in Russian).
9. Sidorov G.P. Fish resources of the Bolshezemelskaya tundra. Leningrad: Nauka, 1974. 164 p. (in Russian).
10. Flora and fauna of water bodies of the European North (case-study of the lakes of the Bolshezemelskaya tundra) / Ed. M.V. Getsen. Leningrad: Nauka, 1978. 192 p. (in Russian).
11. Belyakov V.P., Skvortsov V.V. Macro- and meiobenthos, their production // Features of the ecosystem structure of the Far North lakes (case-study of the lakes of Bolshezemelskaya tundra). Sankt-Peterburg: Nauka, 1994. P.183–202 (in Russian).
12. Shubin Yu.P., Sidorov G.P. Fishery characteristics of some lakes in the northern Bolshezemelskaya tundra // Some approaches to the organization of environmental monitoring in the North. Syktyvkar: Komi NTs UrO RAN, 1996. P. 152–160 (in Russian).
13. Fefilova E.B., Baturina M.A., Kononova O.N., Loskutova O.A., Khokhlova L.G., Dubovskaya O.P. Long-term changes in aquatic communities in the Kharbeyskie Lakes // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2014. V. 7. No. 3. P. 240–266 (in Russian).
14. Loskutova O.A., Baturina M.A. Macrozoobenthos communities in small tundra lakes of the European North-east of Russia // Inland Water Biol. 2022. V. 15. No. 6. P. 851–859. doi: 10.1134/S1995082922060128
15. Dzunino M., Dzulini A. Biogeography (evolutionary aspects). Moskva: Italo-Rossiyskiy institut ekologicheskikh issledovaniy i obrazovaniya: Geograficheskii fakultet MGU, 2010. 317 p. (in Russian).
16. Mangerud J., Astakhov V.I., Murray A., Svendsen J.I. The chronology of a large ice-dammed lake and the Barents–Kara ice sheet advances, northern Russia // Global and Planetary Change. 2001. V. 31. No. 1. P. 321–336. doi: 10.1016/S0921-8181(01)00127-8
17. Mangerud J., Jakobsson M., Alexanderson H., Astakhov V., Clarke G.K.C., Henriksen M., Hjort C., Krinner G., Lunkka P., Möller P., Murray A., Nikolskaya O., Saarnisto M., Svendsen J.I. Ice-dammed lakes and rerouting of the drainage of northern Eurasia during the last glaciation // Quat. Sci. Rev. 2004. V. 23. P. 1313–1332. doi: 10.1016/j.quascirev.2003.12.009
18. Methodology for studying biogeocenoses of inland water bodies / Ed. F.D. Mordukhai-Boltovskoy. M.: Nauka, 1975. 240 p. (in Russian).
19. Kononova O.N., Fefilova E.B. Methodological guide for determining the size and weight characteristics of zooplankton in the European North of Russia. Syktyvkar: IB Komi NTs UrO RAN, 2018. 152 p. (in Russian).
20. Pravdin I.F. Guide to studying fish. Moskva: Pishcheyaya promyshlennost, 1966. 376 p. (in Russian).
21. Shitikov V.K., Rosenberg G.S., Zinchenko T.D. Quantitative hydroecology: methods, criteria, solutions: in 2 books. Moskva: Nauka, 2005. Book 1. 281 p. (in Russian).
22. Hammer Ø., Harper D., Ryan P. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4.
23. Ringnér M. What is principal component analysis? // Nat. Biotechnol. 2008. V. 26. No. 3. P. 303–304. doi: 10.1038/nbt0308-303
24. Kononova O.N., Dubovskaya O.P., Fefilova E.B. Zoo- and dead zooplankton of Kharbeyskie lakes of Bolshezemelskaya tundra (period from 2009 to 2012) // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2014. V. 7. No. 3. P. 303–327 (in Russian).
25. Makartseva E.S., Prilezhaev I.D. Zooplankton and its production // Features of the ecosystem structure of the Far North lakes (case-study of the lakes of Bolshezemelskaya tundra). Sankt-Peterburg: Nauka, 1994. P. 146–168 (in Russian).
26. Ponomarev V.I. The structure of the ichthyofauna in the More-Yu River basin (the Khaipudyrskaya Bay basin, the Barents Sea) // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Division of the Russian Academy of Sciences. 2023. No. 6. P. 37–46. doi: 10.19110/1994-5655-2023-6-37-46

27. Reshetnikov Yu.S. Peculiarities of Arctic ichthyofauna // *Uspehi sovremennoj biologii*. 2024. V. 144. No. 2. P. 234–244 (in Russian). doi: 10.31857/S0042132424020104
28. Nikolsky G.V. The structure of the species and patterns of fish variability. Moskva: Pishchevaya promyshlennost, 1980. 184 p. (in Russian).
29. Chernov Yu.I. Ecology and biogeography. Selected papers. Moskva: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 580 p. (in Russian).
30. Astakhov V.I., Svendsen J.I., Matiouchkov A., Mangerud J., Maslenikova O., Tveranger J. Marginal formations of the last Kara and Barents ice sheets in northern European Russia // *Boreas*. 1999. V. 28. No. 1. P. 23–45. doi: 10.1111/j.1502-3885.1999.tb00205.x
31. Alpine waters / Ed. U. Bindi. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010. V. 6. 278 p.
32. Ponomarev V.I., Loskutova O.A., Kononova O.N. Structure of aquatic communities in mountain lakes of the Torgovaya River basin (Subpolar Urals) // *Russ. J. Ecol.* 2022. V. 53. P. 404–412. doi: 10.1134/S1067413622050101
33. Bilton D., Freeland J.R., Okamura B. Dispersal in freshwater invertebrates // *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 2001. V. 32. P. 159–181. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114016

Аккумуляция тяжёлых металлов в компонентах природной среды на территории накопленной техногенной нагрузки

© 2026. С. Ф. Шаяхметов, д. м. н., в. н. с.,
 А. В. Меринов, к. б. н., н. с.,
 О. М. Журба, д. б. н., зав. лабораторией,
 А. Н. Алексеенко, к. х. н., с. н. с.,
 Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований,
 665827, Россия, г. Ангарск, 12а микрорайон, д. 3, а/я 1170,
 e-mail: salimf53@mail.ru

Проведён сравнительный анализ содержания мобильных форм тяжёлых металлов (ТМ) в снежном покрове, почвах и в волосах детского населения на территории г. Свирска. Выявлены особенности распределения и аккумуляции ТМ в природных средах и волосах у детей в разных функциональных зонах города, обусловленные значительным техногенным воздействием выбросов промпредприятий, ТЭЦ, частных домохозяйств и накопленных опасных отходов бывших производств. Обнаружено, что наибольшие уровни накопления элементов по сравнению с фоновыми значениями отмечаются в почвах для As, Zn, Cr и Pb (в 10,5–145,0 раз), значительно ниже – в снежном покрове для Cd, Mn, Zn и Pb (2,0–4,6 раз). Показатель суммарного загрязнения (Z_c) снежного покрова ТМ в районах города соответствует низкому уровню, а почв – от умеренно-опасного в центре многоэтажной жилой застройки города до опасного и чрезвычайно опасного уровня загрязнения в промышленной и малоэтажной жилой зонах. Выявлены высокие уровни накопления Mn, Cr, Zn, Cd, Pb и As в волосах детей, превышающие референсные значения в 1,4–24,0 раз. Установлены тесные корреляционные связи ($r = 0,78–0,83$) между содержанием ТМ в снежном покрове возле школ и в волосах у детей в разных зонах города, что свидетельствует об экологической напряжённости в городе и высоком риске здоровью населения.

Ключевые слова: тяжёлые металлы, снег, почва, волосы детей, территория города.

Heavy metal accumulation in the natural environment components in the territory of accumulated technogenic load

© 2026. S. F. Shayakhmetov ORCID: 0000-0001-8740-3133*
 A. V. Merinov ORCID: 0000-0001-7848-6432*
 O. M. Zhurba ORCID: 0000-0002-9961-6408*
 A. N. Alekseenko ORCID: 0000-0003-4980-5304*

East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research,
 Bldg. 3, Microraiion 12a, P.O.Box 1170, Angarsk, Russia, 665827,
 e-mail: salimf53@mail.ru

A comparative analysis of the mobile forms of heavy metals (HM) content in the Svirsk snow cover, soils and children's hair was carried out. Features of the HM distribution and accumulation in natural environments and children's hair in different functional sites of the city were identified, due to the significant technogenic impact of emissions from industrial enterprises, thermal power plants, private households and accumulated hazardous waste from former industries. It was found that the highest levels of HM accumulation compared to background values are observed in soils for As, Zn, Cr and Pb (10.5–145.0 times), significantly lower in snow cover for Cd, Mn, Zn and Pb (2.0–4.6 times). In the city districts the HM total pollution indicator (Z_c) in snow cover corresponds to a low level, and in soils – from moderately dangerous in the center of multi-storey residential buildings of the city to dangerous and extremely dangerous levels of pollution in industrial and low-rise residential sites. High levels of Mn, Cr, Zn, Cd, Pb and As accumulation in children's hair were revealed, exceeding reference values by 1.4–24.0 times. Close correlations ($r = 0.78–0.83$) have been established between the HM content in the snow cover near schools and in the children's hair in different city sites. The above indicates environmental tension in the city and a high risk to public health.

Keywords: heavy metals, snow, soil, children's hair, city territory.

Загрязнение окружающей среды (ОС) является одной из острейших экологических проблем для всех государств. Рост вредных выбросов промышленного производства в атмосферу ведёт к увеличению содержания технологических поллютантов вокруг предприятий и на урбанизированной территории. Вследствие длительного накопления атмосферных выпадений поллютантов, деградации, усадка и прекращения деятельности устаревших вредных производств, их заброшенного состояния на территории крупных и малых городов обнаруживаются объекты накопленного экологического вреда в виде многокомпонентных загрязняющих веществ [1, 2]. Одним из наиболее распространённых поллютантов – загрязнителей являются соединения тяжёлых металлов (ТМ), которые оказывают негативное влияние на урбоэкосреду и здоровье населения. В связи с этим при оценке экологических последствий воздействия ТМ уделяют внимание определению содержания элементов в компонентах природной среды (снег, вода, почва и др.) и биосубстратах организма человека [3–6].

Снежный и почвенный покров являются одними из удобных и надёжных объектов для изучения распределения и накопления ТМ в ОС. Геохимическими исследованиями установлены количественные связи между содержанием ТМ в атмосферном воздухе и выпадением их на территории городов, что регистрируется в виде аномалий загрязнений в снеговом и почвенном покрове [1, 7]. Изучение химического состава снегового покрова позволяет выявить интенсивность воздействия, ореолы распространения и реальную степень загрязнения территории ТМ в течение периода залегания снега. В почве происходит накопление ТМ за многолетний период. Из почв ТМ мигрируют в сопредельные среды – открытые и подземные водоёмы, а также в растения. Доказано, что водорастворимые и подвижные формы ТМ биологически активны, оказывают негативное воздействие на функционирование системы «почва – микробиота – растения» [8] и организм человека при поступлении со вдыхаемым воздухом, питьевой водой, продуктами питания [2, 5]. Самым доступным информативным биосубстратом содержания ТМ в организме являются волосы, которые отражают процессы длительного поступления и накопления элементов в организме [9, 10]. Отмечены преимущества использования элементного анализа волос в гигиенической диагностике и раннем выявлении патологических изменений в организме [5, 6, 9, 11].

В настоящее время в научной литературе накоплено достаточно данных о содержании ТМ в снеговом покрове и почвах городов с разным профилем промышленного производства и уровнем техногенного воздействия на урбосреду [2–4, 12–15]. При этом результаты исследования освещаются в большей мере фрагментарно, а изучению особенностей химического состава и накопления ТМ одновременно в объектах природной среды и в биосубстратах человека на территориях экологического неблагополучия уделяется недостаточно внимания. Комплексная оценка содержания ТМ в волосах человека и в разных компонентах урбоэкосреды позволит определить реальный риск здоровью населения и разработать меры по улучшению экологической обстановки на территории высокой техногенной нагрузки.

Цель данной работы – выявить особенности распределения и аккумуляции тяжёлых металлов в снежном покрове, почвах и в волосах человека в разных функциональных зонах промышленно-урбанизированной территории накопленного экологического вреда в г. Свирске Иркутской области.

Объекты и методы исследования

Исследования были проведены в г. Свирске Иркутской области, относящемся к малым промышленным городам (население 12600 чел., общая площадь 38,2 км²). На территории города расположены промплощадки бывших предприятий: Ангарский металлургический завод (АМЗ) по производству мышьяка (1934–1949 гг.) и завод свинцовых аккумуляторов «Востсибэлемент» (1939–2000 гг.). В 2011–2014 гг. с промплощадки АМЗ были вывезены опасные отходы и грунты, проведена рекультивация земель [16]. Кроме того, в городе находятся заводы: Автоспецдеталь, мотостроительный, рудоремонтный, ремонтно-механический, аккумуляторный, деревообрабатывающий, а также ТЭЦ и котельные. Уровень загрязнения атмосферного воздуха в городе характеризуется как очень высокий: среднегодовые концентрации взвешенных веществ превышают ПДК в 2,2 раза, а максимальные разовые – в 12 раз [17].

Объектами исследования были пробы снега, почв и волосы детей (7–13 лет) в различных зонах города. Отбор проб снега и почв проводили в соответствии с РД 52.04.186-89 и ГОСТ 17.4.3.01-2012 на 11 участках: промышленная зона – деревообрабатывающий завод (1), бывшие АМЗ (2) и завод «Востсибэлемент» (3),

район ТЭЦ и аккумуляторного завода «Актех-Байкал» (4); селитебная зона – школы № 1 (5) и № 3 (6) в многоэтажном жилом секторе в центре города, школа в микрорайоне Макарьево (7), район садоводства «Виктория» (8) и ул. Комсомольской (9) в малоэтажном секторе по периферии города; рекреационная зона – прибрежный лесной массив (10); условно фоновая зона – открытая местность района с. Чемодариха (11).

В пробах снега (фильтратах талой воды) определяли приоритетные водорастворимые, а в почвах – подвижные формы элементов: Pb, As, Zn, Cd, Mn, Cr, Cu, Fe. Состояние городских почв оценивали согласно СанПин 1.2.3685-21. Интенсивность накопления химических элементов в исследуемых объектах определяли с помощью коэффициента концентрации (накопления) K_c (формула 1), оценку степени загрязнения снежного покрова и почв производили по показателю суммарного загрязнения Z_c (формула 2) согласно [7]:

$$K_{Ci} = \frac{C_i}{C_{\phi}} \quad (1)$$

где C_i и C_{ϕ} – фактическое и фоновое содержание элементов в снеге (мкг/л) и почве (мг/кг).

$$Z_c = \sum K_{Ci} - (n - 1) \quad (2)$$

где n – количество учитываемых химических элементов.

Также были проведены исследования содержания элементов в волосах детей, обучающихся в школе № 3 в центральной части города (25 чел.) и в школе мкр. Макарьево на территории малоэтажного жилого сектора (27 чел.). Отбор проб волос детей проводили с затылочной части головы сотрудниками лаборатории эколого-гигиенических исследований с соблюдением этических принципов, изложенных в Хельсинской декларации (с поправками 2008 г.). Полученные результаты сопоставлены с региональными референсными уровнями содержания элементов в волосах детского населения Иркутской области [18, 19]. Для элементного анализа образцов снега, почвы и волос использовали атомно-абсорбционную систему с пламенной и электротермической атомизацией Agilent 240FS/240/Ultr AA (Agilent Technologies, USA).

Статистическая обработка полученных данных проведена с помощью MS Excel и программного обеспечения Jamovi (version 2.3). Для сравнения показателей использовали непараметрические критерии Манна-Уитни, коэффициент корреляции Спирмена.

Результаты и обсуждение

Анализ химического состава ТМ в снежном покрове и почвах г. Свирска показал, что

Таблица 1 / Table 1
Содержание тяжёлых металлов в снежном покрове (мкг/л) и почвах (мг/кг) г. Свирска
Heavy metals content in snow cover (µg/L) and soils (mg/kg) in Svirsk

Показатель / Index	Pb	As	Zn	Cd	Mn	Cr	Cu	Fe
Минимум Minimum	<u>40,0</u> 2,9	<u>0,03</u> 0,06	<u>25,0</u> 1,0	<u>3,0</u> 0,04	<u>24,0</u> 71,4	<u>9,0</u> 0,26	<u>3,0</u> 0,82	<u>25,5</u> 5,1
Максимум Maximum	<u>115,0</u> 366,7	<u>0,66</u> 8,7	<u>260,0</u> 36,0	<u>11,0</u> 0,28	<u>272,5</u> 149,7	<u>28,0</u> 4,8	<u>41,5</u> 3,1	<u>413,5</u> 67,9
Среднее Average	<u>52,9</u> 83,0	<u>0,23</u> 2,9	<u>69,5</u> 11,8	<u>4,6</u> 0,12	<u>86,8</u> 108,7	<u>19,8</u> 1,9	<u>12,0</u> 1,6	<u>152,5</u> 14,6
Стандартное отклонение Standard deviation	<u>22,3</u> 136,6	<u>0,21</u> 3,5	<u>69,0</u> 11,7	<u>2,4</u> 0,07	<u>75,8</u> 30,7	<u>6,7</u> 1,4	<u>10,9</u> 0,7	<u>121,3</u> 18,9
Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	<u>42,2</u> 164,5	<u>91,3</u> 120,6	<u>99,3</u> 99,1	<u>52,2</u> 58,3	<u>87,3</u> 28,2	<u>33,8</u> 73,7	<u>90,8</u> 49,8	<u>79,5</u> 129,4
Фоновый уровень Background level	<u>26,0</u> 7,9	<u>0,16</u> 0,02	<u>30,0</u> 0,2	<u>1,0</u> 0,04	<u>29,0</u> 65,5	<u>16,0</u> 0,12	<u>6,5</u> 1,3	<u>192,5</u> 3,5
ПДК для почв MPC for soils	6	–	23	–	100	6	3	–
$K_{c\text{ ср}}$ $K_{c\text{ average}}$	<u>2,0</u> 10,5	<u>1,4</u> 145,0	<u>2,3</u> 59,0	<u>4,6</u> 3,0	<u>3,0</u> 1,7	<u>1,2</u> 15,8	<u>1,8</u> 1,2	<u>0,8</u> 4,2

Примечание: над чертой – содержание ТМ в снеговом покрове, под чертой – в почвах; «–» – данные отсутствуют; $K_{c\text{ ср}}$ – среднее значение коэффициента концентрации (накопления).
Note: the heavy metals content in the snow cover is given above the line, in the soils – below the line; “–” – no data available; $K_{c\text{ average}}$ – average value of the concentration (accumulation) coefficient.

Таблица 2 / Table 2

Показатели коэффициента накопления (K_c) и суммарного загрязнения (Z_c) тяжёлыми металлами снегового покрова и почв исследуемых участков г. Свирска / Indicators of the accumulation coefficient K_c and total pollution Z_c of heavy metals in the snow cover and soils in the Svirsk studied areas

Зона Zone	Участок Site	K_c								Z_c
		Pb	As	Zn	Cd	Mn	Cr	Cu	Fe	
Промышленная Industrial	1	<u>1,9</u>	<u>1,8</u>	<u>1,2</u>	<u>4,5</u>	<u>0,9</u>	<u>1,1</u>	<u>2,0</u>	<u>0,4</u>	<u>6,8</u>
		2,3	55,0	51,0	3,0	2,3	14,2	0,8	2,9	124,3
	2	<u>1,7</u>	<u>0,9</u>	<u>1,2</u>	<u>3,0</u>	<u>0,8</u>	<u>0,8</u>	<u>1,4</u>	<u>0,3</u>	<u>3,1</u>
		3,4	410,0	29,0	3,5	1,2	11,7	1,6	2,6	456,0
3	<u>1,8</u>	<u>1,2</u>	<u>1,2</u>	<u>3,5</u>	<u>9,4</u>	<u>1,4</u>	<u>6,4</u>	<u>0,5</u>	<u>18,4</u>	
	39,8	65,0	180,0	7,0	1,2	13,3	1,3	19,4	320,	
4	<u>4,4</u>	<u>4,1</u>	<u>1,5</u>	<u>3,0</u>	<u>2,5</u>	<u>0,6</u>	<u>0,8</u>	<u>2,2</u>	<u>12,1</u>	
	46,4	435,0	45,0	3,5	2,1	7,8	1,1	2,7	536,6	
Многоэтажная Multi-storey	5	<u>1,7</u>	<u>0,3</u>	<u>2,2</u>	<u>5,0</u>	<u>5,2</u>	<u>1,7</u>	<u>1,4</u>	<u>1,2</u>	<u>11,7</u>
		0,4	3,0	5,0	1,0	1,7	20,8	2,4	3,2	30,5
6	<u>1,6</u>	<u>0,2</u>	<u>2,5</u>	<u>5,0</u>	<u>3,0</u>	<u>1,6</u>	<u>2,2</u>	<u>0,9</u>	<u>10,0</u>	
	1,3	4,0	12,0	2,5	1,1	40,0	0,6	1,6	56,1	
Малоэтажная Low-storey	7	<u>2,2</u>	<u>1,1</u>	<u>2,3</u>	<u>3,0</u>	<u>1,5</u>	<u>0,8</u>	<u>0,5</u>	<u>0,6</u>	<u>5,0</u>
		4,8	320,0	61,0	3,0	2,0	2,2	1,3	1,7	389,0
	8	<u>1,8</u>	<u>3,3</u>	<u>8,6</u>	<u>11,0</u>	<u>2,8</u>	<u>1,5</u>	<u>1,3</u>	<u>1,4</u>	<u>24,7</u>
3,0		70,0	39,0	1,5	1,4	4,0	1,0	2,0	115,0	
9	<u>1,5</u>	<u>0,4</u>	<u>0,8</u>	<u>4,0</u>	<u>1,0</u>	<u>1,7</u>	<u>1,0</u>	<u>0,1</u>	<u>3,5</u>	
	1,6	9,5	152,0	3,0	2,3	26,7	0,9	4,0	193,0	
Рекреационная Recreational	10	<u>1,8</u>	<u>0,8</u>	<u>1,7</u>	<u>3,5</u>	<u>2,8</u>	<u>1,2</u>	<u>1,5</u>	<u>0,3</u>	<u>6,6</u>
		2,3	85,0	18,0	1,5	1,4	15,0	1,1	1,5	118,8

Примечание: показатели коэффициента накопления и суммарного загрязнения тяжёлыми металлами снега – над чертой, почв – под чертой.

Note: indicators of the coefficient of accumulation and total contamination with heavy metals for snow cover are given above the line, for soil – below the line.

уровни содержания элементов в отобранных пробах варьируют в широком диапазоне величин и имеют неоднородный характер пространственного распределения на территории города (табл. 1).

Большой диапазон колебаний концентраций ТМ во всех отобранных пробах снега зафиксирован для As (22 раза), Fe (16,2 раз), Cu (14 раз), Mn (11,3 раз), Zn (10,4 раз), в пробах почв – для Pb (126 раз), As (45 раз), Zn (36 раз), Cr (18 раз) и Fe (3 раз). Для данных элементов были также характерны высокие значения коэффициента вариации, что в целом указывает на наличие участков локального загрязнения в городе.

Сравнение средних концентраций ТМ в изученных пробах с фоновым содержанием

показывает активное накопление всех элементов в снежном и почвенном покрове. В наибольшей степени это проявляется в почвах для As, Zn, Cr и Pb, несколько ниже – в снежном покрове для Cd, Mn, Zn и Pb. Соотношение максимального содержания ТМ в почвах с установленными для них ПДК выявило превышение уровня Pb в 61,1 раза, Zn – в 1,6 раза и Mn – в 1,4 раза, что свидетельствует об опасном химическом загрязнении почв на исследуемой территории.

Результаты определения ТМ в пробах снега и почв, отобранных в разных функциональных зонах города, демонстрируют существенные различия показателей коэффициента накопления ТМ и суммарного загрязнения на участках наблюдения (табл. 2).

Наибольшие значения (> 3 единиц) накопления Cd в снежном покрове наблюдаются на всех участках промышленной, селитебной и рекреационной зон; Mn – на территории бывшего завода «Востсибэлемент» (3) и в центре города возле школ № 1 (5) и № 3 (6); As и Pb – вблизи ТЭЦ и аккумуляторного завода (4); Zn и As – в зоне малоэтажной застройки возле садоводства «Виктория» (8); Cu – в промзоне завода «Востсибэлемент» (3). На остальных участках города показатель K_c в основном колеблется от 0,1 до 2,8. В целом накопление водорастворимых ТМ в снежном покрове города возрастает в ряду Cr → As → Cu → Pb → Zn → Mn → Cd.

В почвах максимальные значения накопления As и Zn отмечаются на всех участках промзон, Pb – в зоне бывшего завода «Востсибэлемент» (3), в районе ТЭЦ и аккумуляторного завода (4); меньшие – по Cd и Cr отмечаются в почвах всех промзон. В селитебных зонах наибольшее накопление As и Pb проявляется в районе школы мкр. Макарьево (7) и садоводства «Виктория» (8), Cr и Zn – повсеместно, включая рекреационную зону (10). Аккумуляция подвижных форм ТМ в почвах города возрастает в следующем ряду: Cu → Mn → Cd → Fe → Pb → Cr → Zn → As.

Высокие значения показателя накопления ТМ, вероятно, связаны с выбросами промышленных предприятий и интенсивным повсеместным выпадением токсичных элементов при сжигании угля на ТЭЦ, в котельных и печах домов малоэтажного сектора в холодный период года. Частая сменяемость господствующих ветров также способствует переносу поллютантов в разные части города, формируя мозаичную картину загрязнения снежного и почвенного покрова.

Расчёт показателя суммарного загрязнения Z_c снежного покрова и почв свидетельствует, что степень загрязнения снега водорастворимыми ТМ в районах города соответствует низкому уровню загрязнения ($Z_c < 32$), с наибольшими значениями возле садоводства «Виктория» (18,4) и на территории бывшего завода «Востсибэлемент» (24,7). Установленные показатели согласуются с данными исследований других авторов [4, 20]. В этих исследованиях отмечено, что более 60 % техногенных выпадений ТМ в снеге содержится в форме труднорастворимых соединений, которые являются менее опасными для живых организмов.

Почвы промышленных зон и малоэтажной жилой застройки характеризуются опасным (участки №№ 1, 8) и чрезвычайно опасным

(участки №№ 2–4, 7, 9) уровнем загрязнения ТМ. Состояние почв на территории расположения многоэтажного жилого сектора соответствует опасному (участок № 6) и умеренно-опасному (участок № 5) уровню загрязнения, рекреационной зоны – опасной степени загрязнения (участок № 10). Основными факторами, влияющими на формирование геохимических аномалий и степень загрязнения почв ТМ, являются многолетнее концентрирование атмосферных выпадений поллютантов и наличие накопленных вредных отходов бывших заводов по производству мышьяка и аккумуляторов. Степень загрязнения почв г. Свирска ($Z_c = 30,5–456,0$) значительно превышает показатели для ряда зон других городских агломераций: в Красноярске Z_c составляет 6,1–36,0 [2]; Владими́ре – 4,0–32,0 [3]; Кирове – 3,1–28,0 [15]; Первоуральске – 60,0; Кировограде – 190,0; Владикавказе – 271,0 [4].

Завершающим этапом исследования являлось определение содержания ТМ в волосах учащихся детей двух школ, расположенных в разных зонах города. При анализе элементного статуса человека исследователи сопоставляют полученные результаты с экологическими особенностями изучаемого региона [9–11]. В этом случае организм человека рассматривается в качестве замыкающего звена урбоэкосистемы.

Результаты проведённых нами исследований показывают, что у детей г. Свирска наблюдается повышенное содержание Zn, Cu, Cd, As, Cr и Mn в волосах, превышающее региональные референсные уровни в среднем в 1,4–24,0 раза (рис.). При этом самые высокие отклонения от референсных уровней фиксируются для Cr и Mn, кратность превышения которых в обследованных группах детей обеих школ достигает в среднем 8,2–9,7 и 18,4–24,0 раза соответственно. Для таких элементов, как Pb и Fe, градиенты превышения отмечаются только по их максимальным значениям (в 2,1 и 3,0 раза).

В группе у учащихся школы мкр. Макарьево, расположенной в малоэтажном жилом секторе, градиенты накопления As, Zn, Cd и Cr в волосах выше, а Mn – ниже, чем у учащихся школы № 3, находящейся в центре города с многоэтажной застройкой. Аккумуляция элементов в волосах у детей школы мкр. Макарьево возрастает в следующем порядке $Cu_{1,8} = Zn_{1,8} \rightarrow Cd_{1,9} \rightarrow As_{3,0} \rightarrow Cr_{9,7} \rightarrow Mn_{18,4}$, а у детей школы № 3 – $As_{1,0} \rightarrow Cd_{1,4} \rightarrow Zn_{1,5} \rightarrow Cu_{1,8} \rightarrow Cr_{8,2} \rightarrow Mn_{24,0}$.

Обнаружены статистически значимые связи ($r = 0,78–0,83$, $p < 0,05$) между концен-

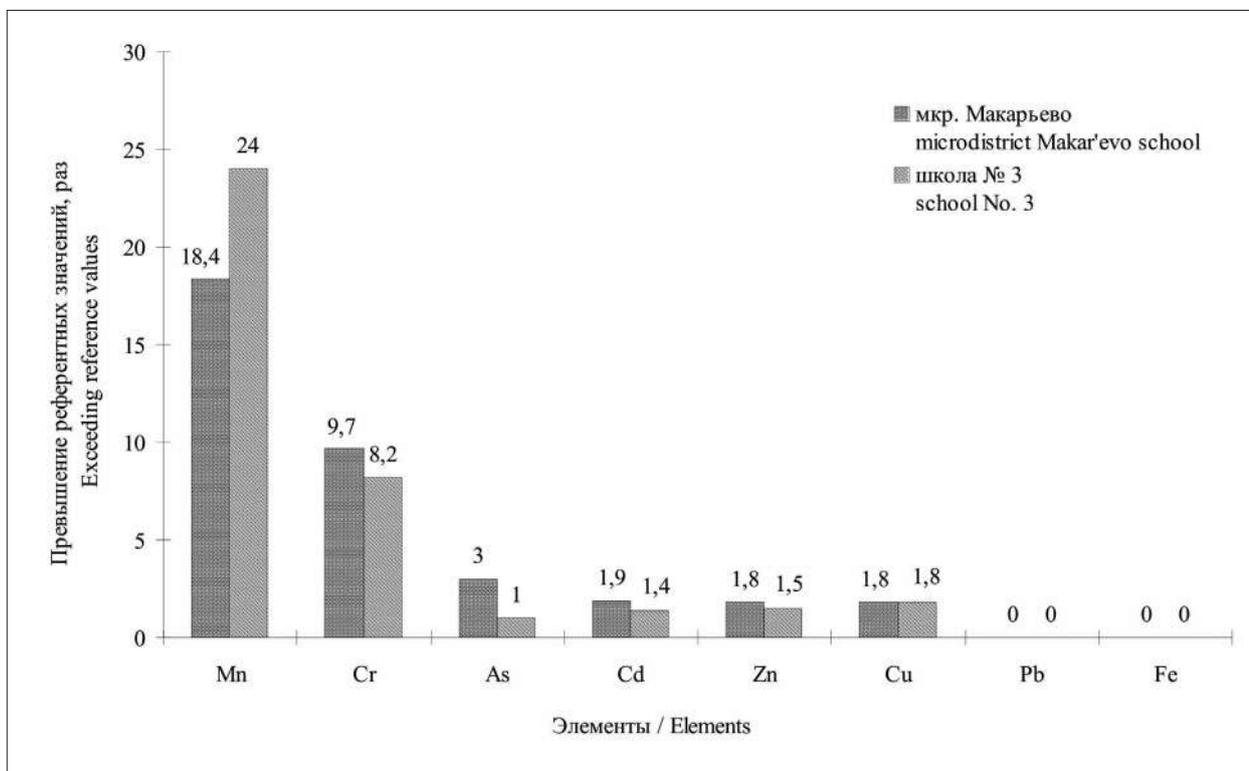


Рис. Градиент накопления тяжёлых металлов в волосах детей на территории г. Свирска
Fig. Gradient of heavy metal accumulation in the Svirsk children's hair

трациями ТМ в волосах учащихся обеих школ и их содержанием в снеговом покрове, что указывает на вклад техногенного загрязнения атмосферного воздуха в накопление ТМ в организме человека. В то же время выявленные взаимосвязи между содержанием ТМ в почве и волосах детей не имеют статистической значимости ($p > 0,05$), поскольку их поступление из почвы в организм обусловлено, в основном, алиментарными факторами [9]. В работе [16] показано, что высокое содержание ТМ в местных почвах г. Свирска может приводить к увеличению содержания их в выращиваемой здесь продукции растениеводства. Дальнейшее изучение содержания ТМ в почвах – растительных культурах – биосубстратах человека позволит определить уровень накопления элементов-токсикантов в организме и оценить опасность загрязнения компонентов ОС на изучаемой территории для здоровья населения. Таким образом, итоги исследования подтверждают экстремальность экологической ситуации в городе и необходимость реализации комплекса профилактических мер по её улучшению.

Заключение

Впервые проведено комплексное исследование содержания ТМ в снежном покрове,

почвах и волосах детей на урбанизированной территории накопленного экологического вреда в г. Свирске. Установлены высокие показатели аккумуляции ТМ и неоднородный характер их пространственного распределения в разных зонах города, обусловленные воздействием выбросов промпредприятий, ТЭЦ, печей частных домохозяйств и опасных отходов бывших производств мышьяка и аккумуляторов. В наибольшей степени накопление элементов в снеге проявляется для Cd, Mn, Zn и Pb, в почвах – для As, Zn, Cr и Pb. Показатель суммарного загрязнения снежного покрова в городе соответствует малоопасному уровню загрязнения, почв – от умеренно-опасного в центре многоэтажной жилой зоны города до опасного и чрезвычайно опасного уровня загрязнения в промышленных зонах и малоэтажном жилом секторе. Выявлены высокие уровни накопления Mn, Cr, As, Cd, Zn и Pb в волосах детей и тесные корреляционные связи между содержанием ТМ в снежном покрове и волосах детей. Полученные данные свидетельствуют об экологической напряжённости в городе, высоком риске здоровью населения и необходимости реализации профилактических мероприятий на территории накопленного экологического вреда.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной темы № 224020100490-2.

Литература

1. Касимов Н.С., Власов Д.В. Тяжёлые металлы и металлоиды в почвах Российских городов (по данным ежегодных докладов Росгидромета) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2018. № 3. С. 14–22.

2. Мучкина Е.Я., Бадмаева С.Э., Коротченко И.С., Горлушкина К.С. Анализ распределения подвижных форм тяжёлых металлов в почвенном покрове промышленно-урбанизированной территории г. Красноярска // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 4. С. 66–71. doi: 10.18412/1816-0395-2020-4-66-71

3. Трифонова Т.А., Курочкин И.Н., Курбатов Ю.Н. Тяжёлые металлы в почвах различных функциональных зон урбанизированных территорий: оценка содержания и экологического риска // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 38–46. doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-038-046

4. Курбаков Д.Н., Кузнецов В.К., Сидорова Е.В., Саруханов А.В., Дементьева Н.В., Новикова Н.В. Сравнительная оценка загрязнения тяжёлыми металлами снежного покрова предприятиями чёрной металлургии // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 8. С. 59–65. doi: 10.18412/1816-0395-2022-8-59-65

5. Савченков О.В. Влияние загрязнения окружающей среды тяжёлыми металлами на здоровье детей дошкольного возраста // Экология человека. 2018. № 3. С. 16–20. doi: 10.33396/1728-0869-2018-3-16-20

6. Yu G., Chen F., Zhang H., Wang Z. Pollution and health risk assessment of heavy metals in soils Guizhou, China // Ecosyst. Health Sustain. 2021. V. 7. No. 1. Article No. 185948. doi: 10.1080/20964129.2020.1859948

7. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населённых пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 1990. 17 с.

8. Иванцова Е.А., Холоденко А.В., Тихонова А.А., Герман Н.В., Постнова М.В., Водолазко А.Н. Влияние присутствия подвижных форм Zn, Cu, Ni на функционирование системы «почва–микробиота–растение» в зерновых агроценозах // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 11. С. 56–59. doi: 10.18412/1816-0395-2018-11-56-59

9. Чанчаева Е.А., Гржибовский А.М., Куриленко Т.К., Малков П.Ю. Концентрация кадмия в волосах населения субъектов Российской Федерации: систематический обзор // Гигиена и санитария. 2023. Т. 102. № 1. С. 40–49. doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-40-49

10. Скальный А.В. Химические элементы в физиологии и экологии человека. М.: Издательский дом «ОНИКС 21 век»; Мир, 2004. 216 с.

11. Баранова О.В., Брудастов Ю.А., Детков В.Ю., Мироненко А.Н. Оценка содержания микроэлементов

в волосах жителей региона с повышенной антропогенной нагрузкой // Вестник восстановительной медицины. 2013. № 2. С. 64–66.

12. Hulisz P., Charzyński P., Greinert A. Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: a comparative case study of Toruń and Zielona Góra // J. Soils Sediments. 2018. V. 18. No. 2. P. 358–372. doi: 10.1007/s11368-016-1596-x

13. Van De Vijver E., Delbecq N., Verdoodt A., Seuntjens P. Estimating the urban soil information gap using exhaustive land cover data: the example of Flanders, Belgium // Geoderma. 2020. V. 372. Article No. 114371. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114371

14. Лисецкая Л.Г., Шаяхметов С.Ф. Оценка уровня загрязнения снежного покрова химическими соединениями и элементами на территории Шелеховского района в Восточной Сибири // Гигиена и санитария. 2022. Т. 101. № 12. С. 1443–1449. doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449

15. Горностаева Е.А., Березин Г.И., Дабах Е.В. Тяжёлые металлы в снежном покрове и городских почвах // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 110–117. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-110-117

16. Кузьминова О.В., Пройдакова О.А., Янчук Т.М., Оценка степени загрязнения тяжёлыми металлами компонентов природной среды г. Свирска (Иркутская область) // Известия Иркутского государственного университета. Сер.: Биология. Экология. 2015. Т. 11. С. 81–92.

17. О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2021 году: государственный доклад. Ижевск: ООО «Принт», 2022. 252 с.

18. Ефимова Н.В., Лисецкая Л.Г., Журба О.М., Тараненко Н.А., Боева А.В., Дьякович О.А., Алексеенко А.Н., Меринов А.В., Кучерявых Е.И., Донских И.В., Ткачук Е.А. Региональные референсные уровни содержания химических веществ в биосубстратах населения Иркутской области: методические рекомендации. Ангарск: Иркутский институт повышения квалификации работников образования, 2013. 28 с.

19. Элементный статус населения Сибирского и Дальневосточного федерального округов // Элементный статус России. Ч. 5 / Под ред. А.В. Скального, М.Ф. Киселёва. СПб.: Медкнига «ЭЛБИ-СПб», 2014. 544 с.

20. Салтан Н.В., Святковская Е.А., Тростенюк Н.Н. Оценка загрязнения снегового покрова урбозкоисотемы Кольского Севера в зоне влияния железнодорожных отводов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 78–83. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-078-083

References

1. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Heavy metals and metalloids in urban soils of Russian cities (according to the annual reports of Rosgidromet) // Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya. 2018. No. 3. P. 14–22 (in Russian).

2. Muchkina E.Ya., Badmaeva S.E., Korotchenko I.S., Gorlushkina K.S. Assessment of heavy metals distribution in soil cover of industry-urban area of Krasnoyarsk // *Ecology and Industry of Russia*. 2020. V. 24. No. 4. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2020-4-66-71
3. Trifonova T.A., Kurochkin I.N., Kurbatov Yu.N. Heavy metals in soils of various functional zones of urbanized territories: assessment of the content and environmental risk // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 38–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-038-046
4. Kurbaev D.N., Kuznetsov V.K., Sidorova E.V., Sarukhanov A.V., Dementieva N.V., Novikova N.V. Comparative assessment of heavy metal pollution of snow-pack by iron and steel foundries // *Ecology and Industry of Russia*. 2022. V. 26. No. 8. P. 59–65 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2022-8-59-65
5. Savchenko O.V. Environmental heavy metals pollution effect on preschool children's health // *Human Ecology*. 2018. No. 3. P. 16–20 (in Russian). doi: 10.33396/1728-0869-2018-3-16-20
6. Yu G., Chen F., Zhang H., Wang Z. Pollution and health risk assessment of heavy metals in soils Guizhou, China // *Ecosyst. Health Sustain*. 2021. V. 7. No. 1. Article No. 185948. doi: 10.1080/20964129.2020.1859948
7. Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution in populated areas by metals based on their content in snow cover and soil. Moskva: IMGRE, 1990. 17 p. (in Russian)
8. Ivantsova E.A., Kholodenko A.V., Tikhonova A.A., German N.V., Postnova M.V., Vodolazko A.N. Influence of the presence of mobile forms Zn, Cu, Ni on functioning of the system “soil–microbiota–plant” in grain agrocenoses // *Ecology and Industry of Russia*. 2018. V. 22. No. 11. P. 56–59 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-11-56-59
9. Chanchaeva E.A., Grjibovski A.M., Kurilenko T.K., Malkov P.Yu. Cadmium concentrations in hair in the population of the subjects of the Russian Federation: a systematic review // *Hygiene and Sanitation*. 2023. V. 102. No. 1. P. 40–49 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-40-49
10. Skalniy A.V. Chemical elements in human physiology and ecology. Moskva: Izdatelskiy dom “ONIKS 21 vek”; Mir, 2004. 216 p. (in Russian).
11. Baranova O.V., Brudastov Ju.A., Detkov V.Ju., Mironenko A.N. Evaluation of content of trace elements in the hair of people in the region with increased human pressure // *Bulletin of rehabilitation medicine*. 2013. No. 2. P. 64–66 (in Russian).
12. Hulisz P., Charzyński P., Greinert A. Urban soil resources of medium-sized cities in Poland: a comparative case study of Toruń and Zielona Góra // *J. Soils Sediments*. 2018. V. 18. No. 2. P. 358–372. doi: 10.1007/s11368-016-1596-x
13. Van De Vijver E., Delbecque N., Verdoodt A., Seuntjens P. Estimating the urban soil information gap using exhaustive land cover data: the example of Flanders, Belgium // *Geoderma*. 2020. V. 372. Article No. 114371. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114371
14. Lisetskaya L.G., Shayakhmetov S.F. Assessment of the level of pollution of the snow cover with chemical compounds and elements in the territory of the Shelekhov district in Eastern Siberia // *Hygiene and Sanitation*. 2022. V. 101. No. 12. P. 1443–1449 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2022-101-12-1443-1449
15. Gornostaeva E.A., Berezin G.I., Dabakh E.V. Heavy metals in snow cover and urban soils // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 110–117 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-110-117
16. Kuz'minova O.V., Proydakova O.A., Yanchuk T.M. The heavy metal pollution assessment in the environmental components of Svirk city (Irkutsk Region) // *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya*. 2015. V. 11. P. 81–92 (in Russian).
17. On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2021: State Report. Izhevsk: OOO “Print”, 2022. 252 p. (in Russian).
18. Efimova N.V., Lisetskaya L.G., Zhurba O.M., Taranenko N.A., Boeva A.V., Dyakovich O.A., Alekseenko A.N., Merinov A.V., Kucheryavykh E.I., Donskikh I.V., Tkachuk E.A. Regional reference levels of chemicals in biosubstrates of the population of the Irkutsk region: Guidelines. Angarsk: Irkutskiy institut povysheniya kvalifikatsii rabotnikov obrazovaniya, 2013. 28 p. (in Russian).
19. Elemental status of the population of the Siberian and Far Eastern Federal Districts // *The elemental status of Russia. Part 5* / Eds. A.V. Skal'nyy, M.F. Kiselev. Sankt-Peterburg: Medkniga “ELBI-SPb”, 2014. 544 p. (in Russian).
20. Saltan N.V., Sviatkovskaya E.A., Trostenyuk N.N. Assessment of snow cover pollution in urban ecosystems of the Kola North in the zone of influence of railway branches // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 78–83 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-078-083

Геохимия подземных вод Зилаирского бассейна Уральской гидрогеологической складчатой области (Южный Урал)

© 2026. Т. Д. Шабутдинов, м. н. с.,
Р. Ф. Абдрахманов, д. г.-м. н., г. н. с.,
А. О. Полева, к. б. н., с. н. с.,
В. Н. Дурнаева, м. н. с.,

Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН),
450077, Россия, г. Уфа, ул. Карла Маркса, д. 16/2,
e-mail: timurgeolog11@gmail.com

Ресурсы пресных подземных вод в Республике Башкортостан распределены крайне неравномерно. Особенно вододефицитными являются её восточные районы. Оценка геохимии трещинных подземных вод Зилаирского бассейна, относящегося к Уральской гидрогеологической складчатой области Южного Урала, помогает выявить дополнительные источники пресных подземных вод для обеспечения потребностей населения республики. Согласно проведённому химическому анализу, изученные подземные воды этой территории пресные. Минерализация их составляет от 0,04 до 0,9 г/дм³. Общая жёсткость варьирует в пределах 0,2–3,39 ммоль/дм³. Подземные воды относятся к гидрокарбонатно-магниевому и кальциево-магниевому типам, приурочены к породам ультраосновного и основного составов, являются крайне редкими для Южного Урала. Ввиду низкой минерализации (до 1 г/дм³) и высокого содержания магния, необходимого для нормальной работы всего организма человека, они могут быть рекомендованы для использования в качестве столовых минеральных вод.

Ключевые слова: Зилаирский синклиорий, ресурсы пресных подземных вод, ультрамафиты массивов Крака, гидрокарбонатно-магниевые воды.

Geochemistry of the Zilair basin groundwater in the Ural hydrogeological folded region (Southern Urals)

© 2026. T. D. Shabutdinov ORCID: 0009-0004-2346-1835*
R. F. Abdrakhmanov ORCID: 0000-0003-2953-9694*
A. O. Poleva ORCID: 0000-0003-2607-9354*
V. N. Durnaeva ORCID: 0000-0003-4228-5641*

Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre
of the Russian Academy of Sciences,
16/2, K. Marx St., Ufa, Russia, 450077,
e-mail: timurgeolog11@gmail.com

Fresh groundwater resources in the Republic of Bashkortostan are distributed extremely unevenly. Its eastern regions are particularly water-deficient. An assessment of the geochemistry of fractured groundwater in the Zilair Basin (the Ural hydrogeological folded region, the Southern Urals), helps to identify additional sources of fresh groundwater to meet the needs of the republic's population. All groundwater in this area is fresh. Their salinity ranges from 0.04 to 0.9 g/dm³. Their total hardness ranges from 0.2 to 3.39 mmol/dm³. Groundwater of the magnesium-bicarbonate and magnesium-calcium-bicarbonate types, associated with ultramafic and mafic rocks, is extremely rare in the Southern Urals. Due to their low mineralization (up to 1 g/dm³) and high magnesium content, which is essential for the normal functioning of the human body, they can be used as table mineral waters.

Keywords: Zilair synclinorium, fresh groundwater resources, ultramafic rocks of the Kraka massifs, magnesium-bicarbonate waters.

Республика Башкортостан характеризуется неравномерным распределением эксплуатационных прогнозных ресурсов пресных подземных вод, которые могут использоваться в хозяйственной деятельности [1]. В связи с ростом населения республики и ухудшением экологической ситуации необходимо искать новые источники пресных подземных вод. Для обеспечения восточной части региона могут использоваться подземные воды Зилаирского бассейна, входящего в состав Уральской сложной гидрогеологической складчатой области. Зилаирский бассейн трещинных вод второго порядка расположен на территории Зилаирского синклинория, выделяемого в строении Центрально-Уральской мегазоны на западном склоне Южного Урала [2].

Территория исследований охватывает северную часть Зилаирского синклинория. Здесь встречаются породы ультраосновного и основного составов, которыми сложены массивы Крака (Северный, Средний, Узьянский и Южный) (рис. 1) [3–5]. Обрамление массивов представлено породами нижнего и среднего палеозоя от нижнего ордовика до нижнего карбона, которые, согласно современным представлениям, формируют два литологически разных разреза. В соответствии с этим в Зилаирском синклинории выделяют две зоны: Западно-Зилаирская с карбонатно-терригенным разрезом, сложенным отложениями набуллинской (O_2-S_1nb), узьянской (S_1uz), серменевской (S_2sr), бельской ($D_{1-3}bl$) зилаирской (D_3-C_1zl) свит и ибрагимовской (D_3ib) толщи, и Восточно-Зилаирская с терригенно-кремнистым разрезом, представленным отложениями сухолядской ($O_{1-3}sh$), михалкинской ($S_{1-2}mh$), хуторской ($D_{1-2}ht$), ибрагимовской (D_3ib) толщ и зилаирской (D_3-C_1zl) свиты [6–10].

В восточной части Зилаирского синклинория среди осадочных кремнистых и кремнисто-глинистых пород встречаются вулканиты (вариолиты и гиалобазальты) узьянбашской толщи (D_2ub). Петрохимическая характеристика (мас. %): SiO_2 – 45,97–53,06; Na_2O – 1,47–3,95; K_2O – 0,10–1,75; TiO – 0,66–2,26; Fe_2O_3+FeO – 7,64–14,51; MgO – 3,58–15,24; P_2O_5 – 0,07–0,25; CaO – 4,51–12,13. Эффузивы нормального ряда, натриевой серии, умеренно-глиноземистые [6].

Первые упоминания о гидрогеологии Южного Урала, в том числе Зилаирского бассейна трещинных вод, приводятся в обобщающей работе М.О. Клера 1928 г. [12]. В 50–60-х годах XX века гидрогеологическая характе-

ристика территории была дана Д.И. Иткиным, Н.Н. Тостуновой. В 1962–1968 гг. Кагармановской партией, под руководством А.В. Ключихина, проводилась геологическая съёмка масштаба 1:50 000. Геохимия и условия формирования подземных вод Южного Урала рассматривались в работе [2].

Детальное изучение условий формирования гидрокарбонатно-магниевого вод, а также оценка их качества для использования в хозяйственной деятельности ранее не проводились.

Целью настоящего исследования является выявление влияния компонентов системы «подземная вода – порода» на формирование химического состава подземных вод Зилаирского бассейна Уральской гидрогеологической складчатой области.

Материалы и методы исследований

Гидрокарбонатно-магниевого тип подземных вод является крайне редким для Южного Урала и, как правило, приурочен к породам ультраосновного и основного составов [2]. В районе исследований такие породы встречаются на территории массивов Крака. Подземные воды изучаемой территории характеризуются низкой минерализацией (до 1 г/дм³) и высоким содержанием магния и кальция. Глубина залегания подземных вод, выходящих на поверхность в виде родников, на участках обнажения известняков нижнего девона, часто образующих отвесные обрывы вдоль р. Белой, достигает 80–100 м, а в пределах площади развития других пород – 50–70 м. Подземные воды на территории распространения ультрамафитов залегают на глубине менее 10–15 м. Они проявляются в краевых частях массивов в виде многочисленных, преимущественно рассредоточенных источников, выходящих из-под обломков серпентинитов [2].

На формирование состава вод существенное влияние оказывают атмосферные осадки. Средняя годовая минерализация атмосферных осадков на территории Южного Урала составляет 20 мг/дм³, в то время как для территории изучения она может достигать до 81,5 мг/дм³. Осадки имеют смешанный состав. Главными анионами являются сульфаты (50,0–59,7 %-моль), гидрокарбонаты (23,5–30,6 %-моль) и хлориды (до 26,5 %-моль). Среди катионов существенную роль играют кальций (37,7–49,9 %-моль), магний (30,8–39,1 %-моль) и натрий (8,1–22,0 %-моль). По классификациям О.А. Алёкина и Е.В. Посо-

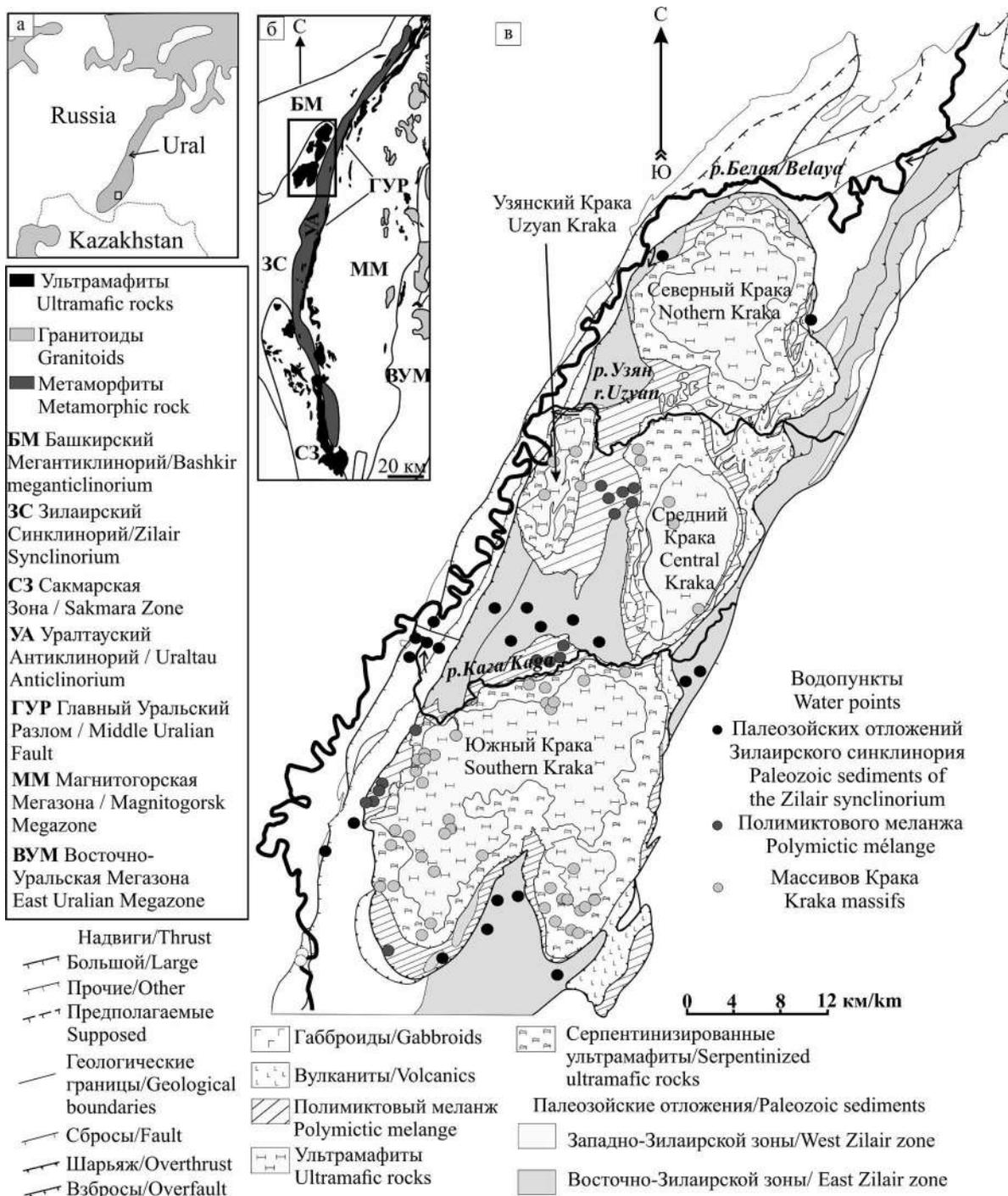


Рис. 1. Местоположение (а, б) и геологическое строение (в) северной части Зилаирского синклиниория [6–8, 11]

Fig. 1. Location (a, б) and geological structure (в) of the Northern Zilair synclinorium [6–8, 11]

хова атмосферные осадки относятся к II типу (сульфатно-натриевому) [2].

Для достижения поставленной цели в ходе полевых работ 2024 г. были отобраны пробы воды из водопунктов северной части Зилаирского синклиниория (рис. 1). Также использовался материал фондовых отчетов. Всего в работе проанализированы данные по 89 водоисточникам. Отбор проб проводился

как из родников и горных выработок (скважин, шурфов, колодцев), так и ручьев (табл. 1), питающихся за счёт источников, выходящих из трещиноватых магматических и осадочных пород территории.

Анализ отобранных проб воды проводился согласно нормативным документам (ГОСТ 31867-2012, ГОСТ 31869-2012, М 01-58-2018, ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97, ПНД

Таблица 1 / Table 1

Пробы воды из водопунктов северной части Зилаирского синклиория
Water samples from water point in the northern part of the Zilair synclinorium

Тип водопункта Type of water point	Количество проб / Quantity of samples		
	Палеозойские отложения Зилаирского синклиория Paleozoic sediments of the Zilair synclinorium (O ₂ -S ₁ nb-D ₃ -C ₁ zl)	Полимиктовый меланж Polymictic melange (mpD ₃ -C ₁ k)	Ультрамафиты массивов Крака Ultramafic rocks of the Kraka massifs
Ручьи / Streams	11	11	31
Родники / Springs	11	6	16
Скважины / Boreholes	1	0	0
Шурфы / Pits	0	1	0
Колодцы / Wells	1	0	0
Общее количество Total quantity	24	18	47

Ф 14.1:2:3:98-97, ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000, ПНД Ф 14.1:2:4.261-2010) в испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Башкортостан», г. Уфа. Полученные результаты пересчитывались из весовой формы (мг/дм³) в мольную (ммоль/дм³) и процент-мольную (%-моль) формы для последующего построения классификационных и корреляционных диаграмм. Классификация вод по анионно-катионному составу и минерализации проводилась согласно работам О.А. Алёкина [13] и Е.В. Посохова [14].

Статистическая обработка данных, а также последующее построение классификационной и корреляционных диаграмм проводились при помощи инструментов Excel.

Результаты и обсуждение

Ввиду сложного геологического строения территории северной части Зилаирского синклиория, представленного ультрамафитами массивов Крака, хаотично перемешанными разновозрастными блоками пород полимиктового меланжа и карбонатно-терригенным и терригенно-кремнистым разрезами отложений нижнего-среднего девона, было решено разделить проанализированные водопункты на три группы (рис. 1, табл. 1).

Первая группа – подземные воды, находящиеся на территории палеозойских отложений Зилаирского синклиория. Эти воды характеризуются гидрокарбонатно-магниево-кальциевым, реже гидрокарбонатно-магниево-кальциевым, гидрокарбонатно-кальциево-магниево-кальциевым и сложным (гидрокарбонатно-сульфатно-кальциево-натриевым, сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-магниево-суль-

фатно-гидрокарбонатно-магниево-кальциевым и др.) составом (рис. 2а, табл. 2). Минерализация подземных вод территории распространения палеозойских отложений составляет 0,04–0,50 г/дм³, общая жёсткость 0,20–3,1 ммоль/дм³, рН 6,8–8,8. По минерализации эти воды пресные, по общей жёсткости варьируют от очень мягких до жёстких. По водородному показателю воды первой группы относятся к слабокислым, слабощелочным и щелочным.

Ко второй группе отнесли воды ручьев и родников, протекающих по породам полимиктового меланжа. Воды данной группы характеризуются преимущественно гидрокарбонатно-магниево-кальциевым, реже сульфатно-гидрокарбонатно-магниево-натриево-кальциевым, сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-кальциевым и пятикомпонентным (сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-магниево-кальциевым) составом (рис. 2б, табл. 2). Минерализация вод, отнесённых ко второй группе, составляет 0,04–0,47 г/дм³ (пресные), общая жёсткость – 0,45–1,25 ммоль/дм³ (мягкие и очень мягкие), рН – 6,8–8,8 (слабокислые-щелочные воды).

В третью группу вошли воды водопунктов территории массивов Крака. По составу это преимущественно гидрокарбонатно-магниево-кальциевые воды (рис. 2в, табл. 2). Исключения составляют водоисточники, где среди катионов начинают преобладать кальций, натрий. Минерализация вод третьей группы достигает значений 0,06–0,9 г/дм³, общая жёсткость 1,05–3,39 ммоль/дм³, рН 7,0–8,9. По величине минерализации воды этой территории также относятся к пресным. По общей жёсткости воды классифицируются от умеренно жёстких до

Таблица 2 / Table 2

Результаты анализа химического состава воды в водопунктах северной части Зилаирского синклинория / Representative analyzes of water from water points in the Northern Zilair synclinorium

№ п/п / Item No.	Тип водопункта Type of water point	Дата отбора Team date	Минерализация, г/дм ³ Mineralisation, g/dm ³	Общая жёсткость, ммоль/дм ³ Total hardness, mmol/dm ³	pH	Ингредиенты, %-моль Ingredients, mol. %							
						HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
Палеозойские отложения Зилаирского синклинория / Paleozoic sediments of the Zilair synclinorium													
1	Родник / Spring	22.10.2024	0,20	1,15	–	94,4	3,7	1,8	0,0	69,4	17,1	12,5	1,0
2	Ручей / Stream		0,50	3,10	–	98,7	0,9	0,4	0,0	7,4	91,5	0,7	0,4
3*	Родник / Spring	1962–1968	0,12	–	7,2	30,0	46,0	24,0	0,0	48,0	18,0	34,0	
4*	Ручей / Stream		0,07	–	7,7	85,0	7,0	8,0	0,0	38,0	47,0	15,0	
Полимиктовый меланж / Polymictic melange													
5*	Ручей / Stream	1962–1968	0,06	–	6,9	54,0	46,0	0,0	0,0	48,0	24,0	28,0	
6*	Родник / Spring		0,33	–	8,8	88,0	1,0	0,0	11,0	10,0	87,0	3,0	
7*	Родник / Spring		0,26	–	8,7	96,0	4,0	0,0	0,0	11,0	84,0	5,0	
8*	Родник / Spring		0,31	–	8,7	90,0	2,0	0,0	8,0	15,0	82,0	3,0	
9*	Ручей / Stream		0,14	–	7,5	88,0	6,0	4,0	2,0	51,0	43,0	6,0	
Ультрамафиты массивов Крака / Ultramafic rocks of the Kraka massifs													
10	Ручей / Stream	29.08.2024	0,40	2,55	8,3	93,6	2,4	4,0	0,0	26,4	66,2	5,3	2,1
11	Ручей / Stream		0,50	3,39	8,3	96,1	1,7	2,2	0,0	24,2	70,1	4,1	1,6
12	Ручей / Stream		0,50	3,30	8,3	94,9	2,2	2,9	0,0	25,6	69,1	4,0	1,3
13*	Родник / Spring	1962–1968	0,35	–	8,9	90,0	2,0	1,0	7,0	9,0	88,0	3,0	
14*	Родник / Spring		0,37	–	8,8	87,0	2,0	1,0	10,0	8,0	86,0	6,0	
15*	Родник / Spring		0,36	–	8,9	89,0	3,0	1,0	7,0	10,0	85,0	5,0	
16*	Родник / Spring		0,33	–	8,8	89,0	1,0	0,0	10,0	6,0	90,0	4,0	
17*	Родник / Spring		0,40	–	8,7	89,0	1,0	0,0	10,0	8,0	87,0	5,0	
18*	Родник / Spring		0,42	–	8,7	89,0	1,0	2,0	8,0	9,0	84,0	7,0	
19*	Родник / Spring		0,39	–	8,2	80,0	16,0	1,0	3,0	9,0	76,0	15,0	

Примечание: * данные приведены по А.В. Ключихину и др. (1962–1968). Прочерк обозначает отсутствие данных.
Note: * Data by A.V. Klochikhina et al. (1962–1968). A dash indicates no data.

жёстких. По водородному показателю относятся к слабощелочным и щелочным типам вод.

При построении корреляционных матриц подземных вод северной части Зилаирского синклинория с позиции гидролитической концепции формирования химического состава подземных вод выявлены зависимости между отдельными геохимическими параметрами.

Очень тесная положительная связь между сульфат-ионом и катионами натрия и калия характерна для подземных вод территории распространения палеозойских отложений и полимиктового меланжа (рис. 3).

Средние по силе корреляционные связи наблюдаются между катионами магния и гидрокарбонат-ионами, минерализацией подземных вод территории распространения вмещающих пород, реже – массивов Крака (рис. 4, 5).

Согласно полученным данным, отмечено пропорциональное увеличение среднего содержания основных ионов от массивов Крака (Na⁺+K⁺ 6,7 %-моль, SO₄²⁻ 5,6 %-моль (N = 47)), через полимиктовый меланж (Na⁺+K⁺ 14,6 %-моль, SO₄²⁻ 16,8 %-моль (N = 18)), к вмещающим породам (Na⁺+K⁺ 18,2 %-моль, SO₄²⁻ – 15,8 %-моль (N = 24)).

При этом самое высокое содержание катионов натрия и калия (до 51,0–56,0 %-моль) и сульфат-ионов (до 51,0–54,0 %-моль) характерно для водоисточников с минерализацией до 0,16–0,17 г/дм³ (реже 0,32–0,40 г/дм³).

Характерна явно выраженная обратная зависимость между содержанием катионов кальция и магния с постепенным преобладанием последнего от вмещающих пород (средние значения Ca²⁺ 41,1 %-моль, Mg²⁺ 40,6 %-моль, N = 24) через полимиктовый меланж (Ca²⁺ 36,2 %-моль, Mg²⁺ 49,3 %-моль, N = 18) к массивам Крака (Ca²⁺ 16,7 %-моль, Mg²⁺ 76,5 %-моль, N = 47).

Столь тесные связи между катионами натрия, калия и сульфат-ионами для водоисточников территории вмещающих пород и полимиктового меланжа могут быть объяснены совместным привнесом этих ионов атмосферными осадками, которые служат существенным источником растворённых веществ [2]. Катионы кальция, присутствующие в водах территории Зилаирского синклиория, также поступают с атмосферными осадками, реже (для территории Западно-Зилаирской зоны) – за счёт растворения карбонатных пород.

Привнос магния в изученные водоисточники объясняется гидролизом породообразующих минералов ультрамафитов (оливина, пироксена), а гидрокарбонат-ион поступает из почв, либо с атмосферными осадками [2]. Исключение составляют полученные данные для водопунктов территории полимиктового меланжа, где, скорее всего, привнос ионов происходит совместно из близко расположенных ультрамафитов.

Заключение

Формирование анионно-катионного состава подземных вод Зилаирского бассейна происходит при взаимодействии компонентов системы «подземная вода–порода». Наблюдается закономерное изменение состава подземных вод. Отмечается постепенное увеличение содержания магния от палеозойских отложений (среднее значение Mg²⁺ 40,6 %-моль) через полимиктовый меланж (Mg²⁺ 49,3 %-моль) к массивам Крака (Mg²⁺ 76,5 %-моль). В то же время для других ионов (Ca²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄²⁻) выражена обратная зависимость, с закономерным увеличением содержания от ультраосновных массивов (средние значения Ca²⁺ 16,7 %-моль, Na⁺+K⁺ 6,7 %-моль, SO₄²⁻ 5,6 %-моль) в сторону вмещающих пород (Ca²⁺ 41,1 %-моль, Na⁺+K⁺ 18,2 %-моль, SO₄²⁻ – 15,8 %-моль). Преиму-

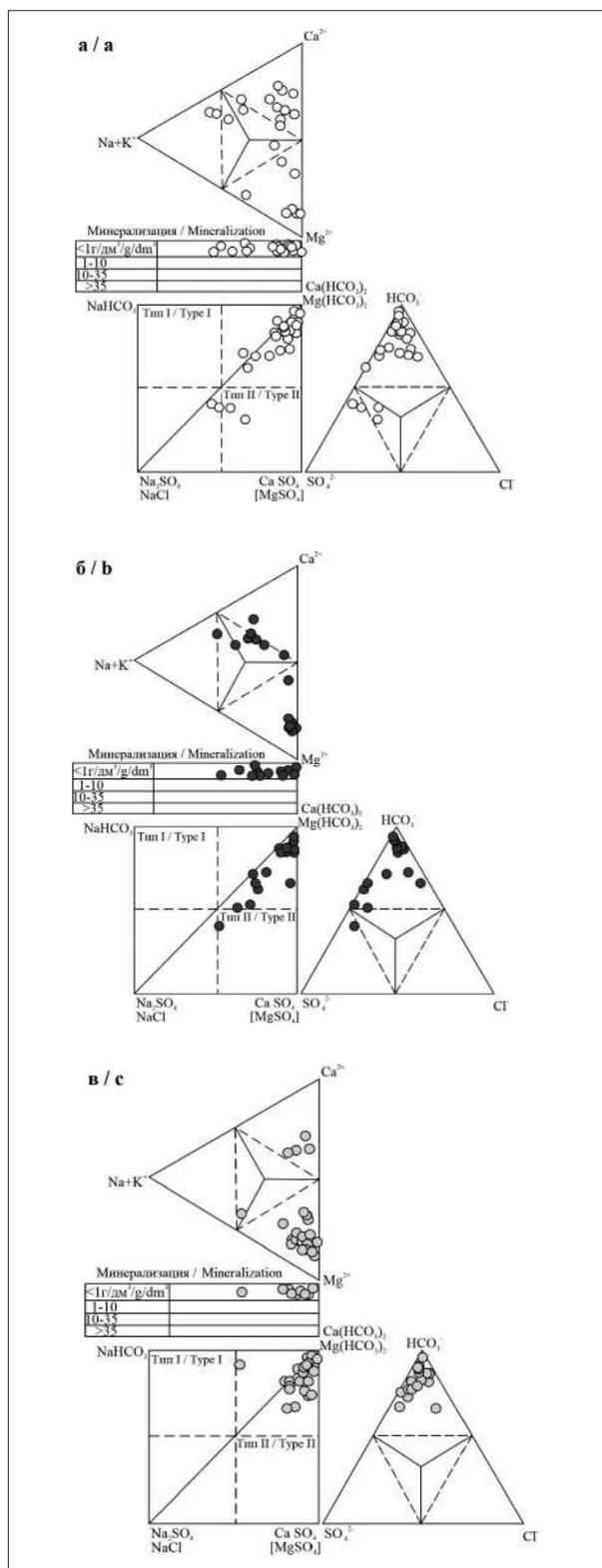


Рис. 2. Классификационная диаграмма, составленная по методу Е.В. Посохова [14], для водопунктов территории распространения: а – палеозойских отложений, б – полимиктового меланжа, в – массивов Крака
Fig. 2. Classification diagram, compiled using E.V. Posokhov's method [14], for water points in the Zilair synclinalium of the distribution area: а – paleozoic sediments of the Zilair synclinalium, б – polymictic melange, с – Kraka massifs

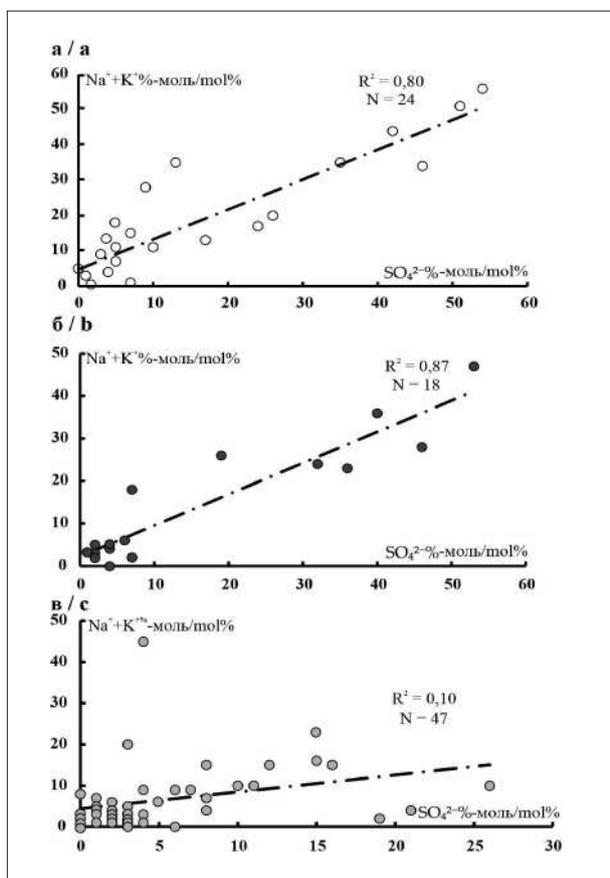


Рис. 3. Связь между содержанием сульфат-ионов и ионов натрия и калия (%-моль) в подземных водах Зилаирского бассейна на территории распространения: а) палеозойских отложений Зилаирского синклинория, б) полимиктового меланжа, в) массивов Крака

Fig. 3. Correlation between sulfate anions and sodium and potassium cations content (mol. %) in groundwater of the Zilair basin in the area of distribution: а – paleozoic sediments of the Zilair synclinorium, б – polymictic melange, с – Kraka massifs

щественно однородный гидрокарбонатно-магниевый тип подземных вод массивов Крака сменяется гидрокарбонатно-кальциево-магниевым, магниевым, магниевым, кальциевым и сложным (сульфатно-гидрокарбонатно-натриево-магниевым, магниевым, кальциевым, гидрокарбонатно-сульфатно-натриево-кальциевым, кальциево-натриевым и др.) типом вод на территории распространения полимиктового меланжа и нижне-среднепалеозойских отложений. Формирование химического состава подземных вод изученной территории происходит как за счёт гидролиза вмещающих пород (Mg^{2+}), так и в ходе привноса ионов атмосферными осадками (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^-). При переходе от водоупунктов массивов Крака к палеозойским отложениям и полимиктовому меланжу су-

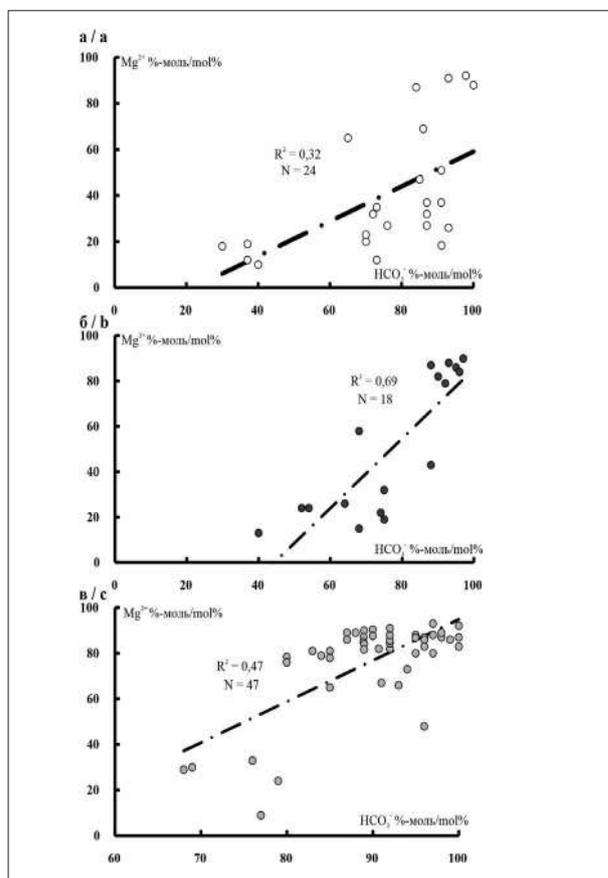


Рис. 4. Связь между содержанием гидрокарбонат-ионов и катионов магния (%-моль) в подземных водах Зилаирского бассейна на территории распространения: а) палеозойских отложений Зилаирского синклинория, б) полимиктового меланжа, в) массивов Крака

Fig. 4. Correlation between bicarbonate anions and magnesium cations content (mol. %) in groundwater of the Zilair basin in the area of distribution: а – paleozoic sediments of the Zilair synclinorium, б – polymictic melange, с – Kraka massifs

щественную роль при формировании химического состава подземных вод играют ионы Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , привносимые атмосферными осадками. На это указывает прямая зависимость между содержанием данных ионов и минерализацией. Самые высокие значения катионов натрия и калия (до 51,0–56,0 %-моль) и сульфат-ионов (до 51,0–54,0 %-моль) характерны для водоисточников с минерализацией до 0,16–0,17 г/дм³, т. е. сравнительно близкой к минерализации атмосферных осадков на данной территории (0,01–0,08 г/дм³, среднегодовое значение для территории Южного Урала 0,02 г/дм³). Для подземных вод территории массивов Крака (с минерализацией до 0,9 г/дм³) формирование гидрокарбонатно-магниевый состава происходит за счёт гидролиза породообразующих

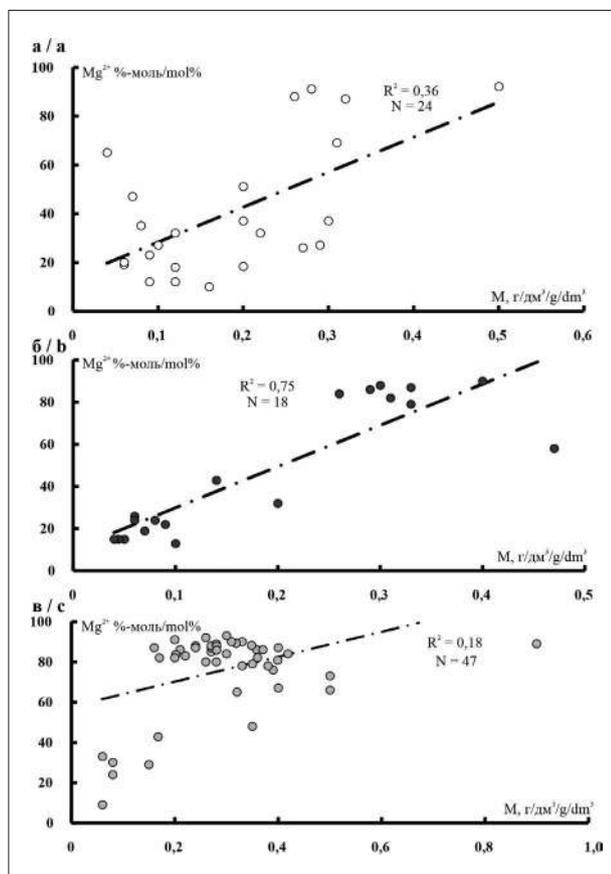


Рис. 5. Связь между минерализацией (M, г/дм³) и содержанием магния (%-моль) в подземных водах Зилаирского бассейна на территории распространения: а) палеозойских отложений Зилаирского синклиория, б) полимиктового меланжа, в) массивов Крака

Fig. 5. Correlation between mineralization (M, g/dm³) and magnesium content (mol. %) in groundwater of the Zilair basin in the area of distribution: a – paleozoic sediments of the Zilair synclinorium, b – polymictic melange, c – Kraka massifs

минералов ультраосновных пород (оливина $(Mg,Fe)_2SiO_4$, ортопироксена $(MgFe)_2Si_2O_6$) и привноса гидрокарбонат-иона атмосферными осадками, либо в ходе биохимических процессов в почве. Присутствие магния в водах территории полимиктового меланжа и палеозойских отложений указывает на источник выноса (ультраосновные массивы).

Значения минерализации (0,04–0,9 г/дм³), общей жёсткости (0,2–3,39 ммоль/дм³) и pH (6,8–8,9) вод в изученных водоисточниках не превышают предельно допустимых концентраций (ПДК) для питьевых вод (СанПиН 1.2.3685-21). Содержание магния в целом не превышает ПДК, регламентированное СанПиН 2.1.4.1116-02. Эти результаты позволяют в перспективе рассматривать подземные воды Зилаирского бассейна в качестве питьевых для

обеспечения населения Белорецкого, Бурзянского и Абзелиловского районов Республики Башкортостан.

Подземные воды гидрокарбонатно-магниевые и кальциево-магниевые типов, являющиеся крайне редкими для Южного Урала, а также приуроченные к породам ультраосновного и основного составов, ввиду низкой минерализации (до 1 г/дм³) и высокого содержания магния соответствуют нормативам ГОСТ Р 54316-2020 и могут использоваться в качестве столовых минеральных вод.

Работы выполнены по темам FMRS 2025–0016 и 2025–0014.

Литература

1. Абдрахманов Р.Ф., Полева А.О., Носарева С.П., Дурнаева В.Н. Техногенез и его влияние на ресурсы пресных подземных вод Южного Урала и Предуралья // Геологический вестник. 2025. № 1. С. 144–158. doi: 10.31084/2619-0087/2025-1-10
2. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала. Уфа: АН РБ, Гилем, 2010. 420 с.
3. Савельев Д.Е., Сначёв В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А. Геология, петрохимия и хромитонность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. 320 с.
4. Савельев Д.Е., Нугуманова Я.Н., Гатауллин Р.А., Сергеев С.Н. Ультрамафиты массива Узянский Крака (Южный Урал) // Геологический вестник. 2018. № 3. С. 79–97. doi: 10.31084/2619-0087/2018-3-6
5. Савельев Д.Е., Биёмбетов А.И., Шабутдинов Т.Д., Самигуллин А.А., Гатауллин Р.А. Минералого-геохимические особенности ультрамафитов восточной части массива Южный Крака (Южный Урал) // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 4. С. 248–259. doi: 10.18599/grs.2024.4.9
6. Князев Ю.Г., Князева О.Ю. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Сер. Южно-Уральская. Лист N-40-XXIII (Белорецк). Объяснительная записка. Уфа: ОАО Башкиргеология, 2006. 194 с.
7. Князев Ю.Г., Князева О.Ю., Сначев В.И., Жданов А.В., Каримов Т.Р., Айдаров Э.М., Масагутов Р.Х., Арсланова Э.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1 000 000. Сер. Уральская. Лист N-40 (Уфа). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 512 с.
8. Ларионов Н.Н., Бергазов И.Р., Грановская Н.В., Нигматуллина А.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Сер. Южно-Уральская. Лист N-40-XXII (Тукан). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2015. 247 с.

9. Якупов Р.Р., Мавринская Т.М., Абрамова А.Н. Палеонтологическое обоснование схемы стратиграфии палеозоя северной части Зилаирского мегасинклинория. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2002. 158 с.

10. Мавринская Т.М., Якупов Р.Р. Ордовикские отложения западного склона Южного Урала и их корреляция по конодонтам и хитинозоям // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 2. С. 333–352. doi: 10.15372/GiG20160204

11. Saveliev D.E., Shilovskikh V.V., Makatov D.K., Gataullin R.A. Accessory Cr-spinel from peridotite massifs of the South Urals: morphology, composition and origin // *Miner. Petrol.* 2022. V. 116. P. 401–427. doi: 10.1007/s00710-022-00791-1

12. Гидрогеология СССР. Т. 15. Башкирская АССР. М.: Недра, 1972. 344 с.

13. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 442 с.

14. Посохов Е.В. Общая гидрогеохимия. Л.: Недра, 1975. 208 с.

References

1. Abdrakhmanov R.F., Poleva A.O., Nosareva S.P., Durnaeva V.N. Technogenesis and its impact on fresh groundwater resources of the Southern Urals and the Cis-Urals // *Geologicheskii vestnik.* 2025. No. 1. P. 144–158 (in Russian). doi: 10.31084/2619-0087/2025-1-10

2. Abdrakhmanov R.F., Popov V.G. Geochemistry and groundwater formation processes in the Southern Urals. Ufa: Gilem Publ. House, 2010. 420 p. (in Russian).

3. Saveliev D.E., Snachev V.I., Savelieva E.N., Bazhin E.A. Geology, petrogeochemistry and chromite-bearing gabbro-ultramafic massifs of the Southern Urals. Ufa: DesignPoligrafService, 2008. 320 p. (in Russian).

4. Saveliev D.E., Nugumanova Ya.N., Gataullin R.A., Sergeev S.N. Ultramafic rocks of the Uzyansky Kraka massif (the Southern Urals) // *Geologicheskii vestnik.* 2018. No. 3. P. 79–97 (in Russian). doi: 10.31084/2619-0087/2018-3-6

5. Saveliev D.E., Biembetov A.I., Shabutdinov T.D., Samigullin A.A., Gataullin R.A. Composition and mineralogi-

cal features of ultramafic rocks in the eastern part of Southern Kraka massif (South Urals) // *Georesursy.* 2024. V. 26. No. 4. P. 248–259 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2024.4.9

6. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Southern Ural Series. Sheet N-40-XXIII (Beloretsk). Explanatory note. Ufa: Bashkirgeologiya JSC. 194 p. (in Russian)

7. Knyazev Yu.G., Knyazeva O.Yu., Snachev V.I., Zhdanov A.V., Karimov T.R., Aidarov E.M., Masagutov R.Kh., Arslanova E.R. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000. Ural Series. Sheet N-40 (Ufa). Explanatory note. Sankt-Peterburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2013. 512 p (in Russian).

8. Larionov N.N., Bergazov I.R., Granovskaya N.V., Nigmatullina A.M. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Southern Ural Series. Sheet N-40-XXII (Toukan). Explanatory note. Moskva: MF VSEGEI, 2015. 247 p. (in Russian).

9. Yakupov R.R., Mavrinskaya T.M., Abramova A.N. Paleontological substantiation of the stratigraphic scheme of the northern part of the Zilair synclinorium. Ekaterinburg: IGG UrO RAS, 2002. 158 p. (in Russian).

10. Mavrinskaya T.M., Yakupov R.R. Ordovician deposits of the western slope of the Southern Urals and their correlation by conodonts and chitinozoans // *Geologiya i geofizika.* 2016. V. 57. No. 2. P. 333–352 (in Russian). doi: 10.15372/GiG20160204

11. Saveliev D.E., Shilovskikh V.V., Makatov D.K., Gataullin R.A. Accessory Cr-spinel from peridotite massifs of the South Urals: morphology, composition and origin // *Miner. Petrol.* 2022. V. 116. P. 401–427. doi: 10.1007/s00710-022-00791-1

12. Hydrogeology of the USSR. V. 15. Bashkirkaya ASSR. Moskva: Nedra, 1972. 344 p. (in Russian).

13. Alyokin O.A. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970. 442 p. (in Russian).

14. Posokhov E.V. General hydrogeochemistry. Leningrad: Nedra, 1975. 208 p. (in Russian).

Оценка содержания гинзенозидов с антиоксидантной активностью в экстрактах из белого женьшеня

© 2026. А. В. Сазанов¹, к. б. н., и. о. зав. кафедрой,
А. А. Алалыкин¹, к. х. н., доцент, М. Л. Сазанова², к. б. н., н. с.,
М. Ю. Милославский³, генеральный директор,
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,
³ООО «Экстракты глубокой очистки»,
610014, Россия, г. Киров, ул. Пугачева, д. 32,
e-mail: usr11759@vyatsu.ru

Гинзенозиды/панаксозиды – гликозиды тритерпеноидов, активные компоненты растений из рода *Panax*, обладающие антиоксидантным, противовоспалительным, антимикробным, противодиабетическим, противоопухолевым действием. С помощью ВЭЖХ-МС/МС исследован химический профиль гинзенозидов углекислотного, водно-спиртового и уксуснокислого экстрактов белого женьшеня, выращенного в Китае. Идентифицировано 23 соединения, в том числе основные полярные гинзенозиды – Rb₁, Rb₂, Rc, Rd (протопанаксадиоловый тип, ППД-тип) и Re, Rf, Rg₁ (протопанаксатриоловый тип, ППТ-тип), а также минорные неполярные – F₂, Rg₃, Rh₂ (ППД-тип) и Rg₂, Rh₁ (ППТ-тип). Нестабильностью олеанановых сапонинов (Ro) при нагревании объясняется их отсутствие в исследуемых экстрактах и появление зингиброзида R₁ (аддукт Ro) в водно-спиртовом экстракте. Основную долю в уксуснокислом и CO₂-экстрактах составляли минорные неполярные гинзенозиды и аддукты; водно-спиртовый экстракт содержал примерно равное количество основных и минорных гинзенозидов. Наибольшее содержание аддуктов с антиоксидантным эффектом – гинзенозиды Rg₃, Rh₁, Rh₂, Rk₁, Ck, Rg₁, Rb₁, Rb₂, Re – отмечено в CO₂-экстракте (67,7 %), наименьшее – в водно-спиртовом (29,7 %).

Ключевые слова: гинзенозиды, *Panax ginseng*, ВЭЖХ-МС/МС, экстракт, антиоксидантное действие.

Assessment of antioxidant ginsenosides content in white ginseng extracts

© 2026. A. V. Sazanov¹ ORCID: 0000-0002-6934-3330, A. A. Alalykin¹ ORCID: 0000-0001-7453-3617
M. L. Sazanova² ORCID: 0000-0003-3492-8395, M. Yu. Miloslavskiy³ ORCID: 0009-0007-8673-9859
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,
³JSC “Extracts of deep purification”,
32, Pugacheva St., Kirov, Russia, 610014
e-mail: usr11759@vyatsu.ru

Ginsenosides/panaxosides are glycosides of triterpenoids, active components of *Panax* plants. They have antioxidant, anti-inflammatory, antimicrobial, antidiabetic, and antitumor effects. The chemical profile of ginsenosides in supercritical carbonic acid (SC-CO₂), aqueous alcohol (70 %), and acetic acid (5 %) extracts of white ginseng cultivated in China was studied using HPLC-MS/MS. The mass fraction of ginsenosides in white ginseng CO₂-extract is higher than in aqueous alcohol and acetic acid extracts, respectively 3.5 %, 2.4 % and 1.1 % dry matter. 23 compounds were identified, including the main polar ginsenosides – Rb₁, Rb₂, Rc, Rd (PPD-type) and Re, Rf, Rg₁ (PPT-type), as well as minor nonpolar ones – F₂, Rg₃, Rh₂ (PPD-type) and Rg₂, Rh₁ (PPT-type). The instability of oleanane saponins (Ro)

upon heating is explained by their absence in the studied extracts and the appearance of zingibroside R₁ (Ro adduct) in the aqueous alcohol extract. Minor nonpolar ginsenosides and adducts accounted for the majority of acetic acid and SC-CO₂ extracts; the aqueous alcohol extract contained approximately equal amounts of major and minor ginsenosides. The highest content of adducts with antioxidant effect – ginsenosides Rg₃, Rh₁, Rh₂, Rk₁, CK, Rg₁, Rb₁, Rb₂, Re – was noted in SC-CO₂ extract (67.7 %), the lowest – in alcohol extract (29.7 %). A product with the desired metabolic profile can be obtained by varying the extraction conditions.

Keywords: ginsenosides, *Panax ginseng*, HPLC-MS/MS, extract, antioxidant effect.

Повышение антропогенной нагрузки на окружающую среду провоцирует развитие в живых организмах оксидативного стресса, связанного с продукцией активных форм кислорода (АФК): супероксид-аниона, пероксида водорода, гидроксильного радикала, синглетного кислорода, гидропероксидов липидов, пероксильных радикалов липидов, алкоксильных радикалов липидов и т. п. [1]. Вырабатываемые аэробами в малых/умеренных количествах АФК выступают в качестве молекулярных сигналов, регулирующих защиту от инфекционных агентов, поддержание тонуса сосудов, контроль вентиляции и выработки эритропоэтина, а также передачу сигналов от мембранных рецепторов в различных физиологических процессах [2]. Парадокс, но многие опосредованные АФК реакции защищают клетки от окислительного стресса [1]. Однако избыток АФК окисляет редокс-чувствительные молекулы белков, липидов, нуклеиновых кислот и др., нарушая метаболизм. В частности, активизируется перекисное окисление липидов (ПОЛ), цепные реакции которого вызывают денатурацию фосфолипидов клеточных мембран, что изменяет степень их текучести и приводит к инактивации связанных с мембраной рецепторов или ферментов. Установлено, что образующиеся при ПОЛ α, β-ненасыщенные реакционноспособные альдегиды (малоновый диальдегид, акролеин, 4-гидроксинонен-2-аль, изопростаны) ковалентно модифицируют критически важные макромолекулы и могут служить маркерами окислительного стресса [1, 3].

Для предотвращения повреждения молекул и клеток при окислительном стрессе у живых организмов выработался эффективный эндогенный механизм для удаления или переработки АФК. Он включает, в первую очередь, низкомолекулярные антиоксиданты (аскорбиновая кислота, полифенолы, флавоноиды, токоферолы, каротиноиды и др.), которые снижают скорость генерации свободных радикалов либо уменьшают концентрации продуктов реакций, протекающих с участием радикалов. Также антиоксидантный эффект проявляет ряд ферментов (дегидроаскорбат-

редуктаза, глутатионпероксидаза, супероксиддисмутаза и др.), которые катализируют металлы переменной валентности и участвуют в разложении гидропероксидов нерадикальным путём [4]. К эндогенным антиоксидантам организма человека, помимо вышеупомянутых ферментов, относятся глутатион, коэнзим Q10, мелатонин, L-карнитин и др. [1]. В условиях, способствующих пролонгированию окислительного стресса, эндогенных антиоксидантов может быть недостаточно, и для поддержания оптимальных клеточных функций могут потребоваться экзогенные антиоксиданты. Пищевые антиоксидантные добавки, равно как и косметические, становятся всё более популярной практикой для поддержания оптимального функционирования организма.

Антиоксидантный эффект выявлен для многих видов растений, в т. ч. для растений из рода *Panax* [5, 6]. Женьшень обыкновенный (*Panax ginseng* C.A. Mey.) является самым распространённым видом рода *Panax* семейства аралиевых; встречается на Дальнем Востоке России, в Китае, Корее, Индии, Мьянме, Камбодже [7]. Основными биологически активными компонентами женьшеня являются гинзенозиды/панаксозиды (сапонины – гликозиды тритерпеноидов), аминокислоты, фенолы, алкалоиды, пептиды и витамины [8]. Физиологические эффекты гинзенозидов сводятся к не связанному с рецепторами антиокислительным, противовоспалительным, антимикробным, противодиабетическим, противоопухолевым [9]. На данный момент идентифицировано 289 гинзенозидов из 11 видов женьшеня [10], суммарное число идентифицированных женьшеневых сапонинов, включая гинзенозиды и их производные, превышает 600 [11]. Содержание гинзенозидов зависит от вида/сорта женьшеня, региона произрастания, возраста растений, сезона сбора урожая, части растения (корень, стебель, листья), метода обработки (белый женьшень, красный или чёрный), а также способа подготовки образца и метода анализа [11, 12]. Например, свежий корень *P. ginseng*, а также белый женьшень (высушенный на солнце или при низкой тем-

пературе) в наибольшем количестве (70 % от общего содержания гинзенозидов) содержат основные полярные гинзенозиды Rb₁, Rb₂, Rc, Rd (протопанаксадиоловый тип, ППД), Re, Rf, Rg₁ (протопанаксатриоловый тип, ППТ), и Ro (олеанановый тип), а также малонилгинзенозиды (Ma-Rb₁, Ma-Rb₂, Ma-Rc, Ma-Rd), тогда как в составе красного женьшеня (пропаривание при 95–100 °С) преобладают минорные гинзенозиды (ППД-тип: Rg₃, Rh₂, Rs₃; ППТ-тип: Rg₂, Rh₁; C17SV-тип: Rk₁, Rg₅) [12, 13].

Международный стандарт для продуктов с женьшенем (CODEX STAN 321-2015) регламентирует только идентификацию основных гинзенозидов Rb₁ и Rf методами тонкослойной или высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ). Однако структура гинзенозидов изменяется при нагревании, изменении pH среды, действии ферментов пищеварительного тракта или микроорганизмов. Основные полярные гинзенозиды окисляются или дегликолизуются или гидролизуются с образованием минорных гинзенозидов. Поскольку физиологическая активность препаратов на основе женьшеня напрямую зависит от количества биологически активных веществ, определение химического профиля гинзенозидов имеет решающее значение для оценки качества сырья и его фармакологической активности [14]. С другой стороны, невысокое содержание гинзенозидов в сухом корне женьшеня предполагает совершенствование методов экстракции с целью наиболее полного извлечения функциональных компонентов [15], а также получения экстрактов с большим молекулярным разнообразием гинзенозидов [16].

Цель работы – определение содержания гинзенозидов, обладающих антиоксидантной активностью, в экстрактах из белого женьшеня.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования использован белый женьшень – высушенный на солнце корень женьшеня, выращенного в провинции Цзилинь (Китай). Выбор объекта исследования обусловлен доступностью и невысокой стоимостью сырья. Сырьё измельчалось с помощью жерновой мельницы, фракция 50 мкм. Экстракты готовили с использованием трёх способов экстракции: углекислотного, спиртового (70 % водный раствор этанола) и уксуснокислого (5 % раствор уксусной кислоты).

СО₂-экстракция осуществлялась с помощью установки ЭЗТ-3 (Россия). 1000 г измельчённого растительного сырья помещали в кассету, которую опускали в термостатированную экстракционную колонку. После герметизации в реактор насосом высокого давления подавали жидкий углекислый газ до создания рабочего давления и фиксировали время начала опыта. Далее многократно осуществлялся процесс экстракции сырья сверхкритическим флюидом углекислого газа в замкнутом контуре. По окончании процесса экстракции насос переключался на перекачку газа в рабочий баллон. При достижении в контуре исходного давления 4–5 МПа насос высокого давления отключался, а остаточное количество газа выбрасывалось в атмосферу через отводящий газопровод. При достижении в системе давления, равного атмосферному, открывался сборник и производилась разгрузка экстракта через сепаратор. Экстракция проводилась в динамичном режиме в течение 60 мин при скорости потока СО₂ 1,4 л/мин. Рабочие параметры в режиме экстракции в докритическом состоянии – 45 °С, 18 МПа; в сепараторе 42 °С, 6 МПа. Полученные экстракты хранились в холодильнике при 4 °С.

Для приготовления водно-спиртового экстракта навеску измельчённого белого женьшеня, массой 7,5 г, экстрагировали 70 % водным этанолом (сырьё:растворитель – 1:10) в течение 3 ч. Полученный экстракт упаривали в роторном испарителе до получения сухого остатка. Для ВЭЖХ-анализа сухие образцы экстрактов (10 мг) растворяли в 1 мл 70 % этанола и фильтровали. Аналогично получали уксуснокислый экстракт (5 % раствор уксусной кислоты, соотношение сырьё:растворитель – 1:30).

Определение содержания гинзенозидов проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматомасс-спектрометрии (ВЭЖХ-МС/МС) на Shimadzu LCMS-8040 (Киото, Япония) с системой трёх квадруполей. Исследуемый образец экстракта женьшеня, объёмом 10 мкл, экстрагировали 2 мл смеси воды с метанолом (1:1 по об.) с целью извлечения гинзенозидов. Полученную смесь фильтровали через шприцевой полиамидный фильтр с размером пор 0,2 мкм и анализировали в следующих условиях.

Колонка Dr. Maisch Reprosil-Pur Basic C18 100 × 2 мм с размером зёрен неподвижной фазы 3 мкм. Дозируемый объём пробы – 10 мкл. Температура термостата колонок – 45 °С. Расход подвижной фазы 0,2 мл/мин.

Режим элюирования – бинарный градиент: фаза «Б» – 20% с 0 до 0,1 мин; 20–95 % с 0,1 до 10 мин; 95 % с 10 до 25 мин. Подвижная фаза: «А» – очищенная вода типа I (Milli-Q) с добавкой муравьиной кислоты (0,01 %); «Б» – изопропиловый спирт. Тип ионизации – электроспрей (положительная полярность); ионизирующее напряжение – 3,5 кВ. Температура интерфейса 400 °С. Температура линии десольватации – 250 °С. Расход газа – распылителя (азот) 3 л/мин. Расход газа – осушителя (азот) 15 л/мин. Режим сбора данных: SIM с регистрацией сигналов по заданным m/z .

Последующую обработку данных осуществляли с помощью программного обеспечения LabSolutions LCMS 5.86. В ходе регистрации сигналов m/z , обусловленных образованием псевдомолекулярных ионов, характерных для определяемых гинзенозидов, получали отдельные масс-хроматограммы. При этом каждая масс-хроматограмма соответствует значению m/z , характерному для своего гинзенозида. В качестве стандартов использован стандартный образец гинзенозидов тип G115 (Shanghai Tauto Biotech Co., Ltd., Китай). Оценку количественного содержания гинзенозидов в пробе делали на основании измерения площадей соответствующих хроматографических пиков.

Результаты и обсуждение

В литературе описано много способов экстрагирования гинзенозидов из женьшеня, основанных на разных факторах. Чаще всего применяют жидкостную экстракцию водой [17, 18], метанолом [18–20], этанолом [13, 15, 18, 19], смесью метанола и этанола в различных соотношениях [18], экстракцию сверхкритическим CO_2 [15], а также микроволновую [11, 15, 18], ультразвуковую [11, 15, 18, 21, 22], сверхвысоким давлением [11, 15] и др. По данным [15], выход гинзенозидов при экстракции в водно-этанольном растворе самый высокий, причём наибольший выход основных/нейтральных гинзенозидов отмечается при 70 % концентрации растворителя. При низких значениях рН гинзенозидный профиль изменяется из-за разрушения и обезвоживания ряда гинзенозидов. Этот факт объясняет отличия гинзенозидного профиля красного и белого женьшеня: при обработке паром большое количество малонил- и ацетилгинзенозидов преобразуется в процессе демалонилирования и деацетилирования, а высвобождающиеся малоновая и уксусная кислоты способствуют дальнейшей деграда-

ции гинзенозидов [17]. С другой стороны, в подобных условиях увеличивается количество минорных гинзенозидов, обладающих широким спектром физиологических эффектов и лучшей усваиваемостью в организме человека [10, 13]. Таким образом, варьируя условия, можно получить экстракты с различным метаболитным профилем под конкретные задачи биологически активного препарата.

Проведённый анализ показал, что массовая доля гинзенозидов в CO_2 -экстракте из белого женьшеня выше, чем в водно-спиртовом и уксуснокислом экстрактах, соответственно 3,5; 2,1 и 1,1 % в пересчёте на сухое вещество, что связано со щадящими условиями экстракции [18].

Химические профили всех образцов были получены с помощью ВЭЖХ-МС/МС. На хроматограмме путём сравнения времени удерживания, значений m/z и ионов фрагментов с данными из литературы были идентифицированы 23 гинзенозида и их аддукта (без учёта стереоизомеров): 15 – в CO_2 -экстракте, 16 – в водно-спиртовом экстракте и 17 – в уксуснокислом экстракте (табл.).

Представленные данные свидетельствуют о наличии в исследуемых образцах ППД-гинзенозидов (Rb_1 , Rb_2 , Rc , Rd , F_2 , Rg_3 , Rh_2) и ППТ-гинзенозидов (Re , Rf , Rg_1 , Rg_2 , Rh_1), и отсутствии олеанановых сапонинов (Ro) (табл.). Согласно [23, 24], белый женьшень относительно богат ППД-гинзенозидами Rb_2 , Rb_3 , Rc , Rd , Re_1 , F_2 и ППТ-гинзенозидами Re , Rf и Rg_1 . Это подтвердили и наши исследования. В частности, установлено, что в сравнении с углекислотным и уксуснокислым экстрактами, водно-спиртовой экстракт из белого женьшеня (щадящие условия изготовления) содержит относительно большое количество Rb_1 , Rb_2 , Rd , Re и Rf (последний в углекислотном и уксуснокислом экстрактах не идентифицирован) (табл.). Низкое содержание основного гинзенозида Rb_1 можно объяснить его неустойчивостью в кислой среде: при $\text{pH} < 6,0$ он трансформируется в $\text{Rg}_3(\text{S/R})$, Rk_1 и Rg_5 [25]. Отсутствие Ro объясняется его гидролизом по сложноэфирной связи C–28 при нагревании выше 60 °С [26]; этим же можно объяснить появление зингиброзида $\text{R}_1(\text{Z-R}_1)$ в водно-спиртовом экстракте, который является аддуктом Ro [13].

Основную долю в CO_2 - и уксуснокислом экстрактах составляли минорные неполярные гинзенозиды – Rh_1 , Rh_2 , Rg_3 , Mc (суммарно, соответственно, 66,2 и 54,4 %) и аддукты – PPT , CK , F_2 (суммарно, соответственно, 28,8

Таблица / Table

Содержание гинзенозидов в образцах различных экстрактов *Panax ginseng*, % от суммы гинзенозидов
Ginsenosides' content in the samples of *Panax ginseng* various extracts, % from the total ginsenosides

Название Name	Псевдомолекулярный ион / Pseudomolecular ion	MS, m/z	Содержание / Content, %*		
			SCE	AE	AAE
G-Rb ₁	[M + Na] ⁺	1131,5	tr.	3,6	0,4
G-Rc	[M + Na] ⁺	1101,5	tr.	2,2	0,7
G-Rb ₂				1,9	
G-Re + G-Rd	[M + Na] ⁺	969,4	1,4	7,0	1,1
GP-XVII				–	
G-Rg ₁	[M + Na] ⁺	823,5	3,6	3,5	3,8
G-Rg ₂	[M + Na] ⁺	819,0	–	4,8	–
VG-R ₄	[M + Na] ⁺	810,6	–	7,3	–
NG-R ₂	[M + Na] ⁺	807,7	–	4,2	3,9
NG-R ₄	[M + Na] ⁺		–	5,8	5,3
G-F ₂	[M + Na] ⁺	807,5	4,8	–	3,1
G-Rf	[M – 2H ₂ O + H] ⁺	781,3	–	14,1	–
G-Mc	[M + Na] ⁺	777,6	8,3	–	8,8
G-M ₁	[M + Na] ⁺	775,5	–	10,0	–
G-Rg ₃ (S/R)	[M – 2H ₂ O + H] ⁺	749,5	4,1	2,6	3,5
G-Rh ₁ (S/R)	[M + Na] ⁺	661,3	3,2	5,1	2,6
G-F ₁				–	
G-CK	[M + Na] ⁺	645,2	4,8	–	1,9
Z-R ₁	[M + Na] ⁺	612,0	–	10,0	–
G-Rh ₂ (S/R)	[M – 2H ₂ O + H] ⁺	587,4	50,6	17,9	39,5
PPT(S)	[M – 2H ₂ O + H] ⁺	441,3	19,2	–	25,4
Всего / Total			100	100	100

Примечание: G – гинзенозид, GP – гипенозид, VG – вина-гинзенозид, NG – нотогинзенозид, Z – зингибросид, PPT – протопанаксатриол; MS – масс-спектр, m/z; * – среднее значение для трёх образцов; экстракты из белого женьшеня: SCE – CO₂-экстракт, AE – водно-спиртовой, AAE – уксуснокислый; tr. – следы; прочерк означает, что вещество не обнаружено; жирным шрифтом выделены гинзенозиды с антиоксидантным действием (по данным [10]).

Note: G – ginsenoside, GP – gypenoside, VG – vinaginsenoside, NG – notoginsenoside, Z – zingibroside, PPT – protopanaxatriol; MS – mass-spectrum, m/z; * – mean value for three samples; tr. – trace amount; white ginseng extracts: SCE – supercritical CO₂-extract, AE – alcohol extract, AAE – acetic-acid extract; a dash means undetected substance; ginsenosides with antioxidant effect (according to [10]) are highlighted in bold.

и 31,6 %). Водно-спиртовой экстракт содержал примерно равное количество основных и минорных гинзенозидов – в сумме, 32,3 и 25,6 % соответственно. Это согласуется с данными [10, 13, 27–30], что при длительной обработке паром 98–100 °С (изготовление красного или чёрного женьшеня), или ферментирования с участием симбионтов кишечника, а также в кислой среде, содержание природных полярных гинзенозидов в продукте постепенно снижается, в то время как повышается содержание вторичных неполярных гинзенозидов, таких как Rg₂, Rh₁ и Rg₃, которые лучше усваиваются организмом. Наше исследование подтвердило данные [29] о наличии минорных неполярных гинзенозидов,

в частности, Rg₂, Rg₃, Rh₁, Rh₂, в спиртовом экстракте из белого женьшеня.

По данным большинства авторов [10, 29, 31–34], антиоксидантный эффект свойственен, в первую очередь, неполярным минорным гинзенозидам – 20(S/R)-Rg₃, Rh₁, Rh₂, Rk₁, соединению K (CK), а также полярным – Rg₁, Rb₁, Rb₂, Re. По нашим данным, наибольшее суммарное содержание вышеуказанных аддуктов отмечено в CO₂-экстракте – 67,7 %, наименьшее – в водно-спиртовом, 29,7 %, что согласуется с ранее описанными результатами: преобладание минорных гинзенозидов в углекислотном экстракте.

В отношении механизмов антиоксидантного эффекта вышеперечисленных гинзено-

зидов установлено следующее. Гинзенозид Rg₃ ингибирует выработку цитокинов, одновременно усиливая действие антиоксидантных ферментов – супероксиддисмутазы, каталазы и глутатиона [31]. Установлена стереоспецифичность в отношении удаления АФК с участием гинзенозидов, получаемых при термической обработке. Так, наличие кратной связи у С-20(22) или гидроксогруппа у С-20, геометрически близкая к ОН-группе у С-12, увеличивает активность гинзенозидов, таких как Rg₅ и 20(S)-Rg₃, по нейтрализации гидроксид-радикалов [32, 33]. Антиоксидантный механизм может быть связан с активацией путей Akt и Nrf2-ARE [31].

Минорный гинзенозид Rh₁ *in vivo* образуется при дегликолизации гинзенозида Rg₁. G-Rh₁ показал широкий спектр фармакологических эффектов, включая противовоспалительное, антиоксидантное, иммуномодулирующее и др. действия. Антиоксидантное действие связано со снижением выработки АФК или подавлением генерации супероксид-радикала за счёт активации сигнального пути Nrf2/НО-1 [34, 35].

Гинзенозид СК считается одним из основных биоактивных метаболитов гинзенозидов Rb₁, Rb₂ и Rc, обладающих различными фармакологическими свойствами, в том числе антиоксидантным, противораковым, антипролиферативным и противодиабетическим действием [36]. Образуется при дегликолизации гинзенозидов кишечной микробиотой и активно всасывается в кровоток [37]. Электронодонорная активность G-СК сопоставима с радикал-связывающим антиоксидантным действием аскорбиновой кислоты [38]. Вероятный механизм подавления окислительного стресса связан со снижением экспрессии НАДФН-оксидазы и ингибированием сигнального пути NF-κB/p38 [34].

По мнению [34, 39], антиоксидантная активность полярных гинзенозидов – Rg₁, Rb₁, Re – связана со снижением выработки маломолекулярного диальдегида и повышением активности супероксиддисмутазы и глутатионпероксидазы через активацию сигнальных путей Nrf2/НО-1, Wnt/β-катенин либо PI3K/Akt/Nrf2. Установлен антиоксидантный эффект гинзенозида Rb₂ в отношении развития остеопороза: G-Rb₂ снижает уровень АФК в клетке, защищает остеобласты от цитотоксичности и остеобластной дисфункции, вызванной H₂O₂ [40].

По мнению [34], комбинация различных гинзенозидов, равно как и сочетание гинзенозидов с другими активными ингредиентами

(например, сочетание тыквенного полисахарида с гинзенозидом Rg₁), может приводить к синергетическому эффекту, усиливая антиоксидантные функции и снижая окислительный стресс.

В целом, исследования показали, что все представленные экстракты содержат набор гинзенозидов с антиоксидантной активностью; наиболее перспективным может считаться СО₂-экстракт.

Заключение

Таким образом, при исследовании содержания гинзенозидов в экстрактах белого женьшеня идентифицировано 23 соединения, среди которых основные полярные гинзенозиды – Rb₁, Rb₂, Rc, Rd (ППД-тип) и Re, Rf, Rg₁ (ППТ-тип), а также минорные неполярные – F₂, Rg₃, Rh₂ (ППД-тип) и Rg₂, Rh₁ (ППТ-тип). Отсутствие олеанановых сапонинов (Ro) в исследуемых экстрактах объясняется их нестабильностью при нагревании: гидролиз по сложноэфирной связи. Основную долю в уксуснокислом и СО₂-экстрактах составляли минорные неполярные гинзенозиды и аддукты; водно-спиртовой экстракт содержал примерно равное количество основных и минорных гинзенозидов. Наибольшее содержание аддуктов с антиоксидантным эффектом (гинзенозиды 20(S/R)-Rg₃, Rh₁, Rh₂, Rk₁, СК) отмечено в СО₂-экстракте – 67,7 %, наименьшее – в водно-спиртовом 29,7 %. При разработке биологически активных добавок важно учитывать условия экстракции, варьируя которые можно получить продукт с желаемым метаболитным профилем.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 125021402208-5.

References

1. Kurutas E.B. The importance of antioxidants which play the role in cellular response against oxidative/nitrosative stress: current state // *Nutr. J.* 2015. V. 15. Article No. 71. doi: 10.1186/s12937-016-0186-5
2. Young I.S., Woodside J.V. Antioxidants in health and disease // *J. Clin. Pathol.* 2001. V. 54. P. 176–186.
3. Kerchev P.I., Van Breusegem F. Improving oxidative stress resilience in plants // *Plant J.* 2022. V. 109. No. 2. P. 359–372. doi: 10.1111/tpj.15493

4. Xie X., He Z., Chen N., Tang Z., Wang Q., Cai Y. The roles of environmental factors in regulation of oxidative stress in plant // *Biomed. Res. Int.* 2019. V. 2019. Article No. 9732325. doi: 10.1155/2019/9732325
5. In M.J., Kim D.C. Antioxidant potential of root extracts of *Panax ginseng* and *Panax notoginseng* // *J. Appl. Biol. Chem.* 2021. V. 64. No. 4. P. 407–411 (in Korean). doi: 10.3839/jabc.2021.055
6. Yang C.C., Chen C.Y., Wu C.C., Koo M., Yu Z.R., Wang B.J. *Panax ginseng* fraction F3 extracted by supercritical carbon dioxide protects against oxidative stress in ARPE-19 cells // *Int. J. Mol. Sci.* 2016. V. 17. No. 10. Article No. 1717. doi: 10.3390/ijms17101717
7. Hassler M. World Plants. Synonymic checklist and distribution of the world flora. Version 25.08 [Internet resource] <https://www.worldplants.de/world-plants-complete-list/complete-plant-list#plantUid-340048> (Accessed: 02.03.2025).
8. Zhou G., Wang C.-Z., Mohammadi S., Sawadogo W.R., Ma Q., Yuan C.-S. Pharmacological effects of ginseng: multiple constituents and multiple actions on humans // *Am. J. Chin. Med.* 2023. V. 51. P. 1085–1104. doi: 10.1142/s0192415x23500507
9. Ratan Z.A., Haidere M.F., Hong Y.H., Park S.H., Lee J.O., Lee J., Cho J.Y. Pharmacological potential of ginseng and its major component ginsenosides // *J. Ginseng Res.* 2021. V. 45. No. 2. P. 199–210. doi: 10.1016/j.jgr.2020.02.004
10. Wang Y., Mou C., Hu Y., He Z., Cho J.Y., Kim J.H. *In vivo* metabolism, pharmacokinetics, and pharmacological activities of ginsenosides from ginseng // *J. Ginseng Res.* 2025. V. 49. No. 5. P. 479–487. doi: 10.1016/j.jgr.2025.05.003
11. Yang Y., Ju Z., Yang Y., Zhang Y., Yang L., Wang Z. Phytochemical analysis of *Panax* species: a review // *J. Ginseng Res.* 2021. V. 45. No. 1. P. 1–21. doi: 10.1016/j.jgr.2019.12.009
12. Hou M.Q., Wang R.F., Zhao S.J., Wang Z.T. Ginsenosides in *Panax* genus and their biosynthesis // *Acta Pharm. Sin. B.* 2021. V. 41. No. 7. P. 1813–1834. doi: 10.1016/j.apsb.2020.12.017
13. Piao X.M., Huo Y., Kang J.P., Mathiyalagan R., Zhang H., Yang D.U., Kim M., Yang D.C., Kang S.C., Wang Y.P. Diversity of ginsenoside profiles produced by various processing technologies // *Molecules.* 2020. V. 25. No. 19. Article No. 4390. doi: 10.3390/molecules25194390
14. Lee J., Han H., Yuan X., Park E., Lee J., Kim J.-H. A rapid, simultaneous and quantitative analysis of 26 ginsenosides in white and red *Panax ginseng* using LC–MS/MS // *Appl. Biol. Chem.* 2021. V. 64. Article No. 13. doi: 10.1186/s13765-020-00588-w
15. Zhang S., Chen R., Wu H., Wang C. Ginsenoside extraction from *Panax quinquefolium* L. (American ginseng) root by using ultrahigh pressure // *J. Pharm. Biomed. Anal.* 2006. V. 41. No. 1. P. 57–63. doi: 10.1016/j.jpba.2005.10.043
16. Wang R.-F., Li J., Hu H.-J., Li J., Yang Y.-B., Yang L., Wang Z.-T. Chemical transformation and target preparation of saponins in stems and leaves of *Panax notoginseng* // *J. Ginseng Res.* 2018. V. 42. No. 3. P. 270–276. doi: 10.1016/j.jgr.2016.08.009
17. Zhang L., Zhou Q.L., Yang X.W. Determination of the transformation of ginsenosides in Ginseng Radix et Rhizoma during decoction with water using ultra-fast liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry // *J. Sep. Sci.* 2018. V. 41. No. 5. P. 1039–1049. doi: 10.1002/jssc.201701228
18. Rodin I.A., Stavrianidi A.N., Braun A.V., Shpigun O.A. Modern approaches for identification and determination of ginsenosides // *Moscow university chemistry bulletin.* 2013. V. 54. No. 3. P. 135–153 (in Russian).
19. Chen Y.J., Zhao Z.Z., Chen H.B., Brand E., Yi T., Qin M.J., Liang Z.T. Determination of ginsenosides in Asian and American ginsengs by liquid chromatography–quadrupole/time-of-flight MS: assessing variations based on morphological characteristics // *J. Ginseng Res.* 2017. V. 41. No. 1. P. 10–22. doi: 10.1016/j.jgr.2015.12.004
20. Kochkin D. V., Glagoleva E. S., Galischev B. A., Spiridovich E. V., Nosov A. M., Reshetnikov V. N. Analysis of ginsenosides in the roots of *Panax ginseng* introduced in the Central Botanical Garden of the NAS of Belarus // *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus.* 2018. V. 62. No. 4. P. 447–454 (in Russian). doi: 10.29235/1561-8323-2018-62-4-447-454
21. Stavrianidi A.N., Rodin I.A., Braun A.V., Shpigun O.A. Rapid method of ultrasound-assisted extraction of ginsenosides from plant materials and ginseng products applicable for HPLC-MS/MS analysis // *Analitika i kontrol.* 2013. V. 17. No. 4. P. 459–464 (in Russian).
22. Zhang P., Zhang D., Ma C., Wang R., Wang W. Free radical scavenging effect and immunomodulatory activity of total saponins extract of ginseng fibrous roots // *Molecules.* 2024. V. 29. Article No. 2770. doi: 10.3390/molecules29122770
23. Wu W., Sun L., Zhang Z., Guo Y., Liu S. Profiling and multivariate statistical analysis of *Panax ginseng* based on ultra-high-performance liquid chromatography coupled with quadrupole-time-of-flight mass spectrometry // *J. Pharm. Biomed. Anal.* 2015. V. 107. P. 141–150. doi: 10.1016/j.jpba.2014.12.030
24. Baleev D.N., Osipov V.I., Savin P.S., Baikova I.P., Sidelnikov N.I. Comparative analysis of the content and composition of ginsenosides in callus culture and root of *Panax ginseng* // *Biotekhnologiya.* 2022. V. 38. No. 2. P. 57–69. doi: 10.56304/S0234275822020028
25. Jang G.Y., Kim M.Y., Lee Y.J., Li M., Shin Y.S., Lee J., Jeong H.S. Influence of organic acids and heat treatment on ginsenoside conversion // *J. Ginseng Res.* 2018. V. 42. No. 4. P. 532–539. doi: 10.1016/j.jgr.2017.07.008
26. Zhu Q., Li D.K., Zhou D.Z., Ye Z.L. Study on hydrolysis kinetics of ginsenoside-Ro in alkaline medium and

- structural analysis of its hydrolysate // *Zhongguo Zhong Yao Za Zhi*. 2014. V. 39. No. 5. P. 867–872 (in Chinese).
27. Chang K.H., Park S.H., Jee H.S., Kim K.T., Paik H.D., Lee J.Y. Enhancement of the cytotoxicities and antioxidative activities of white ginseng extract by hydrolysis under mild acidic conditions // *Food Sci. Biotechnol.* 2014. V. 23. P. 173–178. doi: 10.1007/s10068-014-0023-6
28. Kim S.N., Ha Y.W., Shin H., Son S.H., Wu S.J., Kim Y.S. Simultaneous quantification of 14 ginsenosides in *Panax ginseng* C.A. Meyer (Korean red ginseng) by HPLC-ELSD and its application to quality control // *J. Pharm. Biomed. Anal.* 2007. V. 45. No. 1. P. 164–170. doi: 10.1016/j.jpba.2007.05.001
29. Song H., Song K.W., Hong S.P. Simultaneous quantification of six nonpolar ginsenosides in white ginseng by reverse-phase high-performance liquid chromatography coupled with integrated pulsed amperometric detection // *J. Ginseng Res.* 2020. V. 44. P. 563–569. doi: 10.1016/j.jgr.2019.07.002
30. Kim H.J., Cho J.Y., Kim M.-Y. A comprehensive review of the effects of *Panax ginseng* and its constituents against inflammatory diseases // *J. Ginseng Res.* 2025. V. 49. No. 6. P. 605–612. doi: 10.1016/j.jgr.2025.06.001
31. Park Y.C., Lee C.H., Kang H.S., Kim K.W., Chung H.T., Kim H.D. Ginsenoside-Rh1 and Rh2 inhibit the induction of nitric oxide synthesis in murine peritoneal macrophages // *Biochem. Mol. Biol. Int.* 1996. V. 40. No. 4. P. 751–757. doi: 10.1080/15216549600201353
32. Kang K.S., Kim H.Y., Yamabe N., Yokozawa T. Stereospecificity in hydroxyl radical scavenging activities of four ginsenosides produced by heat processing // *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 2006. V. 16. No. 19. P. 5028–5031. doi: 10.1016/j.bmcl.2006.07.071.071
33. Kang K.S., Kim H.Y., Yamabe N., Park J.H., Yokozawa T. Preventive effect of 20 (S)-ginsenoside Rg3 against lipopolysaccharide-induced hepatic and renal injury in rats // *Free Radic. Res.* 2007. V. 41. No. 10. P. 1181–1188. doi: 10.1080/10715760701581740
34. He B., Chen D., Zhang X., Yang R., Yang Y., Chen P., Shen Z. Oxidative stress and ginsenosides: an update on the molecular mechanisms // *Oxid. Med. Cell Longev.* 2022. V. 2022. Article No. 9299574. doi: 10.1155/2022/9299574
35. Tam D.N.H., Truong D.H., Nguyen T.T.H., Quynh L.N., Tran L., Nguyen H.D., Shamandy B.E., Le T.M.H., Tran D.K., Sayed D., Vu V.V., Mizukami S., Hirayama K., Huy N.T. Ginsenoside Rh1: a systematic review of its pharmacological properties // *Planta Med.* 2018. V. 84. No. 3. P. 139–152. doi: 10.1055/s-0043-124087
36. Huang Y., Liu H., Zhang Y., Li J., Wang C., Zhou L., Jia Y., Li X. Synthesis and biological evaluation of ginsenoside compound K derivatives as a novel class of LXR α activator // *Molecules.* 2017. V. 22. No. 7. Article No. 1232. doi: 10.3390/molecules22071232
37. Lee J.W., Kim M.O., Song Y.N., Min J.H., Kim S.M., Kang M.J., Oh E.S., Lee R.W., Jung S., Ro H., Lee J.K., Ryu H.W., Lee D.Y., Lee S.U. Compound K ameliorates airway inflammation and mucus secretion through the regulation of PKC signaling *in vitro* and *in vivo* // *J. Ginseng Res.* 2022. V. 46. No. 3. P. 496–504. doi: 10.1016/j.jgr.2021.12.008
38. Hossen M.J., Hong Y.D., Baek K.S., Yoo S., Hong Y.H., Kim J.H., Lee J.O., Kim D., Park J., Cho J.Y. *In vitro* antioxidative and anti-inflammatory effects of the compound K-rich fraction BIOGF1K, prepared from *Panax ginseng* // *J. Ginseng Res.* 2017. V. 41. No. 1. P. 43–51. doi: 10.1016/j.jgr.2015.12.009
39. Sng K.S., Li G., Zhou L.Y., Song Y.J., Chen X.Q., Wang Y.J., Yao M., Cui X.J. Ginseng extract and ginsenosides improve neurological function and promote antioxidant effects in rats with spinal cord injury: A meta-analysis and systematic review // *J. Ginseng Res.* 2022. V. 46. No. 1. P. 11–22. doi: 10.1016/j.jgr.2021.05.009
40. Huang Q., Gao B., Jie Q., Wei B.Y., Fan J., Zhang H.Y., Zhang J.K., Li X.J., Shi J., Luo Z.J., Yang L., Liu J. Ginsenoside-Rb2 displays anti-osteoporosis effects through reducing oxidative damage and bone-resorbing cytokines during osteogenesis // *Bone.* 2014. V. 66. P. 306–314. doi: 10.1016/j.bone.2014.06.010

Биологическая очистка производственных сточных вод с использованием носителей из вторичных ресурсов

© 2026. Е. В. Калинина, к. т. н., доцент,
Л. В. Рудакова, д. т. н., зав. кафедрой,
А. А. Трефилова, магистрант,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,
e-mail: Kalininaelena1@rambler.ru

В настоящей работе обоснована целесообразность использования в качестве носителя закреплённой биомассы в процессе биологической очистки сточных вод вторичных материальных ресурсов: мелкой фракции (5–10 мм) хлопьев рециклированного полиэтилентерефталата (ПЭТ), лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок (этикетки) и углеродно-синтетического носителя на основе остатков после термодесорбции нефтесодержащих отходов и отходов полиэтилена низкого давления. Наиболее эффективно закрепление биомассы происходит на лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок (2,25 г/г носителя) и углеродно-синтетическом носителе на основе остатков после термодесорбции нефтесодержащих отходов и отходов полиэтилена низкого давления (3,5 г/г носителя). Применение данных носителей биомассы позволяет повысить эффективность очистки нефтесодержащих сточных вод по сравнению с технологией со свободноплавающим илом на 7 % по нефтепродуктам и на 17 % по показателю химического потребления кислорода (ХПК). Это соответствует эффективности очистки 97 % по нефтепродуктам и 92 % по ХПК. Применение в процессе биологической очистки нефтесодержащих сточных вод носителей биомассы на основе вторичных материальных ресурсов приводит к повышению видового разнообразия свободноплавающих микроорганизмов активного ила почти в 2 раза, увеличению количества микроорганизмов высших трофических уровней, улучшению седиментационных свойств активного ила и повышению прозрачности очищенных сточных вод.

Ключевые слова: очистка сточных вод, активный ил, нефтепродукты, носитель биомассы.

Biological treatment of industrial wastewater using carriers from secondary resources

© 2026. E. V. Kalinina ORCID: 0000-0001-6965-4895

L. V. Rudakova ORCID: 0000-0003-3292-8359, A. A. Trefilova ORCID: 0009-0001-1588-043X

Perm National Research Polytechnical University,
29, Komsomolskiy Ave., Perm, Russia, 614990,
e-mail: Kalininaelena1@rambler.ru

The treatment of industrial wastewater containing toxic impurities is a difficult environmental challenge. It can be solved by using a combination of free-floating and carrier-attached reactive sludge in reactors. Biomass carriers are often made from various synthetic materials (polyamide, polyester, polypropylene, polyurethane, polyethylene), sometimes with the addition of organic and mineral components. In this paper we substantiate the expediency of using secondary resources as a carrier of fixed biomass in the process of biological wastewater treatment. We use fine fraction of recycled PET flakes (5–10 mm), light fraction of PET bottle recycling waste (labels) and carbon-synthetic carrier based on residues after thermodesorption of oil-containing waste and low-pressure polyethylene waste. The most effective biomass fixation occurs on light fraction of PET bottles recycling waste (2.25 g/g of carrier) and carbon-synthetic carrier based on residues after thermodesorption of oil-containing waste and low-pressure polyethylene waste (3.5 g/g of carrier). Application of these biomass carriers allows increasing the efficiency of oily wastewater treatment in comparison with the technology with free-floating sludge by 7 % for oil products and by 17 % for chemical oxygen demand (COD). This corresponds to a treatment efficiency of 97 % for oil products and 92 % for COD. Thus, the species diversity of free-floating microorganisms of activated sludge increases by almost 2 times as well as the number of higher trophic level microorganisms in the sludge, the sedimentation properties of activated sludge improve and transparency of treated wastewater increases as a result of application in the biological treatment of oily wastewater a biomass carriers on secondary resources base.

Keywords: wastewater treatment, activated sludge, oil products, biomass carrier.

Предприятия химического и нефтехимического комплекса потребляют большие объёмы воды на производственные нужды и, следовательно, являются источником образования значительных объёмов сточных вод. Для очистки сточных вод предприятий химического и нефтехимического комплекса применяют механические, физико-химические и биологические методы. Стоит отметить, что реализация процессов биологической очистки производственных сточных вод усложняется неравномерностью их поступления на очистные сооружения, наличием сложноокисляемых и токсичных для микроорганизмов активного ила веществ и залповыми сбросами загрязняющих веществ в результате промывки оборудования, внештатных ситуаций на производстве и др. [1]. Указанные особенности негативно влияют на эффективность биологической очистки сточных вод: изменяется структура хлопья активного ила; происходит деструкция, деформация клеток активного ила и нарушение их метаболизма. Это приводит к вспуханию активного ила, его выносу с очистных сооружений, вторичному загрязнению очищенных сточных вод и существенному снижению эффективности процесса биологической очистки сточных вод.

Одним из способов повышения эффективности биологической очистки производственных сточных вод является использование в системе биологической очистки дополнительно к свободноплавающей биомассе активного ила биомассы, иммобилизованной на носителях. Использование в процессе биологической очистки свободноплавающего и иммобилизованного активного ила позволяет поддерживать различный возраст активного ила, в результате чего повышается окислительная активность сообщества микроорганизмов и его устойчивость к трудноокисляемым токсичным веществам, присутствующим в стоках предприятий химического и нефтехимического комплекса. Иммобилизация биомассы позволяет концентрировать её, увеличивать возраст микроорганизмов и время пребывания в биореакторе и предотвращать вынос взвешенных веществ при поступлении большого объёма стоков или при увеличении скорости водного потока [2].

Носители закреплённой биомассы производятся различных форм (нити, листы, гранулы, диски и др.), как правило, из синтетических материалов (полиамид, полиэфир [3], пенополипропилен [4], стекло/керамопластик [5], полиуретан, полиэтилен [6]) иногда с добавлением органических и минеральных

компонентов (крахмал, микроцеллюлоза [7]). Проводятся исследования по применению различных отходов пластика в качестве загрузки для биофильтров [8–11].

Эффективность очистки сточных вод повышается с увеличением удельной площади поверхности носителей. При иммобилизации биомассы на пористых материалах, обладающих сорбционными свойствами, одновременно протекают процессы адсорбции на поверхности носителя, окисления загрязняющих веществ свободноплавающими и прикреплёнными микроорганизмами [12, 13].

К современным материалам носителям биомассы предъявляются следующие требования: высокоразвитая поверхность, механическая прочность, высокая иммобилизующая способность, доступность и низкая стоимость. Снижение стоимости носителей биомассы может быть достигнуто при вовлечении в производство вторичных ресурсов, в том числе различных видов пластика. Ориентировочные объёмы образования в России бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТ) более 500 000 тыс./т в год [14]. В настоящее время реализуют технологии рециклинга ПЭТ бутылок, но при этом остаются следующие перерабатываемые фракции: мелкая фракция (МФ) хлопьев рециклированного ПЭТ (5–10 мм) и лёгкая фракция отходов рециклинга ПЭТ бутылок в виде этикеток.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности использования в качестве носителей закреплённой биомассы для биологической очистки трудноокисляемых сточных вод материала, полученного на основе остатков после термодесорбции нефте содержащих отходов и отходов полиэтилена низкого давления, а также отходов рециклинга ПЭТ бутылок.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе в качестве носителей биомассы использованы: мелкая фракция хлопьев рециклированного ПЭТ (5–10 мм); лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок – этикетки после промывки бутылок и обработки щёлочью (маркировка ПП1) и исходные этикетки (маркировка ПП2).

Также для исследований были синтезированы образцы углеродно-синтетического носителя биомассы (УСНБ) на основе остатков после термодесорбции (ОПТ) нефте содержащих отходов (НСО) и отходов полиэтилена низкого давления (ПНД). Для синтеза УСНБ

использовали следующие отходы нефтеперерабатывающего предприятия: нефтешламы, флотопена и избыточный активный ил [15, 16]. ОПТ НСО были получены термодесорбцией смеси НСО при температуре 450 °С в течение 30 мин. Смесь ОПТ НСО и измельченного ПНД в соотношении 1:1÷3:1 помещали в термоконтролируемый муфельный шкаф на 30 мин при температуре 110–120 °С, после чего перемешивали до получения однородной массы. На выходе получался хлопьевидный продукт с содержанием пироуглерода 12–16 %.

Экспериментальную оценку возможности использования в качестве носителей закреплённой биомассы для биологической очистки трудноокисляемых сточных вод материалов на основе вторичных ресурсов проводили в модельных аэротенках с использованием сточных

вод (СВ) и активного ила (АИ), отобранных на биологических очистных сооружениях нефтеперерабатывающего предприятия. В модельных аэротенках поддерживали следующие технологические параметры: содержание растворённого кислорода 2 мгО₂/дм³, доза АИ 2 г/дм³, время контакта СВ с АИ 4–6 ч. Очищенные сточные воды (ОСВ) имели маркировку: ОСВ–1 при очистке свободноплавающими микроорганизмами АИ, ОСВ–2 при сочетании свободноплавающих и закреплённых на носителях микроорганизмов АИ. Всего было проанализировано 4 варианта носителей из вторичных ресурсов: мелкая фракция хлопьев рециклированного ПЭТ (маркированы МФ); лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок – этикетки после промывки бутылок и обработки щёлочью (маркировка ПП1), исходные этикетки (маркировка ПП2)

Таблица 1 / Table 1

Программа и методы исследования / Programm and methods of research

Объект / Object	Параметр / Parameters	Методика Measurement system
Влияние носителя биомассы на микроорганизмы активного ила Biomass carrier effect on microorganisms in activated sludge		
Иловая смесь в модельных аэротенках Sludge mixture in model aeration tanks	Видовое разнообразие, функциональное состояние Species diversity, functional status	Визуально, микроскопирование Visually, microscopy
	Органолептические показатели (цвет, запах, структура хлопка) / Organoleptic indicators (color, smell, structure of floc)	Органолептически Organoleptically
	Иловый индекс, см ³ /г / Sludge index, cm ³ /g	ФР 1.31.2008.04397 FR 1.31.2008.04397
Биоплёнка Biofilm	Биомасса, г/г носителя / Biomass, g/g of carrier	Гравиметрический Gravimetric
	Видовое разнообразие, функциональное состояние Species diversity, functional state	Визуально, микроскопирование Visually, microscopy
Влияние носителя биомассы на гидрохимическую характеристику стоков Biomass carrier effect on hydrochemical characteristics of wastewater		
Очищенная вода Treated water	Прозрачность, см / Transparency, cm	ФР 1.31.2008.04397 FR 1.31.2008.04397
Влияние носителя биомассы на эффективность очистки стоков Biomass carrier effect on wastewater treatment efficiency		
Сточная вода, очищенная Wastewater, treated wastewater	ХПК, мгО ₂ /дм ³ / COD, mg O ₂ /dm ³	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97 PND F 14.1:2:3.100-97
	Содержание нефтепродуктов, мг/дм ³ Oil content, mg/dm ³	ПНД Ф 14.1:2:4.5-95 PND F 14.1:2:4.5-95
	Концентрация нитрит-ионов, мг/дм ³ Nitrite ion content, mg/dm ³	ПНД Ф 14.1:2:4.3-95 PND F 14.1:2:4.3-95
	Концентрация нитрат-ионов, мг/дм ³ Nitrate ion content, mg/dm ³	ПНД Ф 14.1:2:4.4-95 PND F 14.1:2:4.4-95
	Концентрация ионов аммония, мг/дм ³ Ammonium ion content, mg/dm ³	ПНД Ф 14.1:2:3.1-95 PND F 14.1:2:3.1-95

Таблица 2 / Table 2

Частота встречаемости видов микроорганизмов / Microorganism frequency of occurrence [17]

Частота встречаемости Frequency of occurrence	Количество экземпляров одного вида Number of specimens per species	Баллы / Points
Единично / Occasional	1–3	1
Редко / Rare	4–10	2
Периодически / Periodically	10–20	3
Часто / Frequent	20–40	4
Массово / En masse	40–100	5

и углеродно-синтетический носитель биомассы (маркирован УСНБ) на основе остатков после термодесорбции (ОПТ) нефтесодержащих отходов (НСО) и отходов полиэтилена низкого давления (ПНД). Экспериментальные исследования проводили в трёх–пяти повторностях, результаты представлены как среднеарифметические значения с уровнем доверительной вероятности 0,95.

На первом этапе исследований контролировали скорость закрепления микроорганизмов на носителях биомассы путём взвешивания образцов в одинаковых условиях. Носители биомассы помещали в оболочки из полиамидных волокон и размещали в модельных аэротенках. При стабилизации значений закреплённой биомассы модельные аэротенки переводили в рабочий режим очистки нефтезагрязнённых сточных вод.

Эффективность применения носителей биомассы оценивали по гидрохимическим показателям активного ила и эффективности очистки нефтезагрязнённых сточных вод (табл. 1).

При микроскопировании активного ила на световом микроскопе ZEISS Axiolab 5, (увеличение $\times 600$) определяли функциональное состояние организмов, подсчитывали организмы разных трофических уровней, классифицировали их по индикаторным группам. Частоту встречаемости видов микроорганизмов оценивали по пятибалльной шкале от 1 балла (единично встречается) до 5 баллов (встречаются в массе) (табл. 2).

Для подтверждения факта формирования биоплёнки на носителях использовали флуоресцентный стереомикроскоп с универсальной светодиодной подсветкой, оптической системой Галилея (*Galilean*), а также сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа фирмы «Брукер».

Результаты и обсуждение

Динамика прироста биомассы в статическом режиме на различных носителях представлена на рисунке 1.

Согласно проведённому анализу, основной прирост биомассы происходит в течение 10–14 сут (рис. 1). Биомасса остаётся стабильной в течение 20–25 сут, после чего происходит её снижение. Минимальное количество микроорганизмов закрепляется на МФ хлопьев рециклированного ПЭТ.

Наиболее эффективно происходит закрепление микроорганизмов на углеродно-синтетическом носителе (рис. 2, см. цв. вкладку I), чему способствуют: пористость за счёт присутствия пиро-углерода (12–16 % по массе сухого вещества); наличие в ОПТ НСО пиролизата избыточного активного ила, включающего азот (0,9–0,12 % по массе сухого вещества) и фосфор (2,5–2,9 % по массе сухого вещества), являющихся источниками питания для микроорганизмов.

Совместное применение в аэротенке свободноплавающих и прикреплённых на носителях микроорганизмов АИ приводит к снижению запаха АИ и повышению прозрачности очищенных СВ (табл. 3). Обработка лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок раствором щёлочи снижает эффективность закрепления микроорганизмов на их поверхности, и соответственно, эффективность очистки СВ.

Использование в качестве носителя закреплённой биомассы необработанной лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок и УСНБ позволяет повысить прозрачность очищенной воды, улучшить структуру хлопка и его седиментационные свойства (рис. 3).

Улучшение седиментационных свойств активного ила в модельных аэротенках с использованием носителей биомассы можно объяснить формированием биоценоза ила из представителей высших трофических уровней: раковинных амёб *Centropyxis* sp., брюхожестничных инфузорий *Aspidisca* sp., инфузорий *Litonotus* sp., прикреплённых форм инфузорий *Vorticella* sp., *Opercularia* sp. и *Thuricola* sp., сосущих инфузорий *Tokophrya* sp. и коловраток *Philodina* sp.

Введение в модельные аэротенки носителей закреплённой биомассы привело к увели-

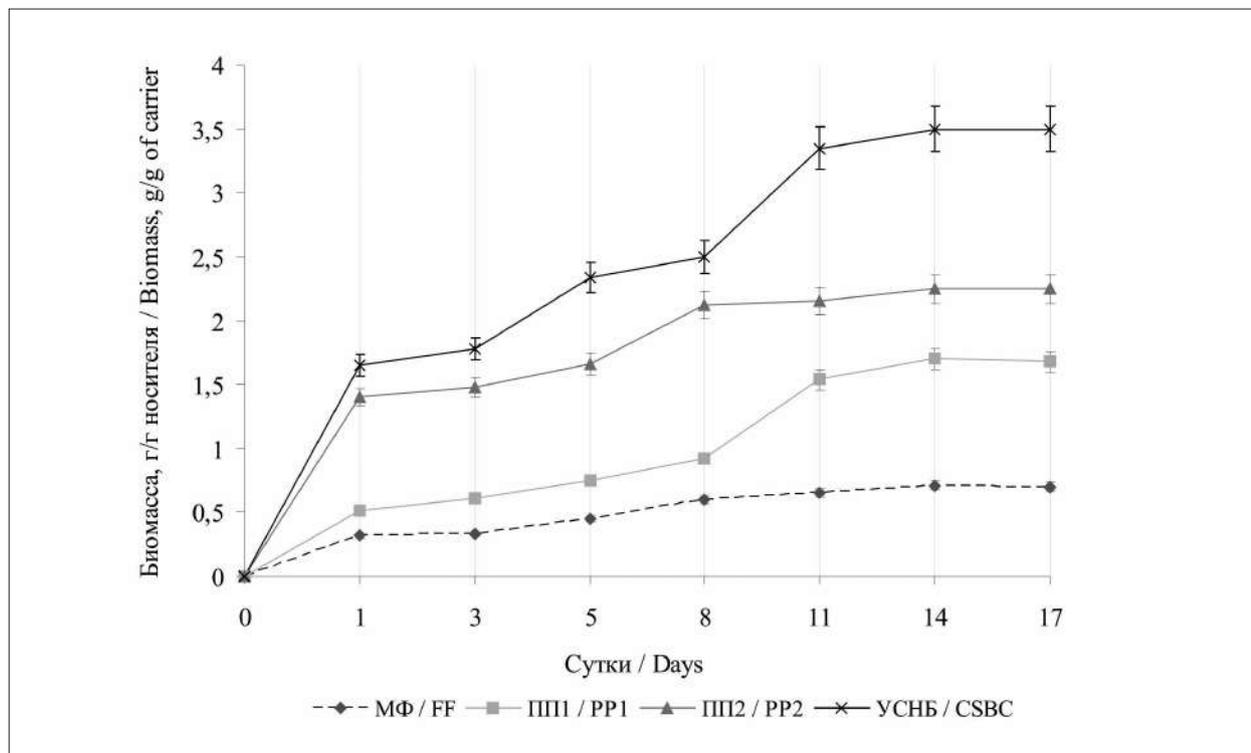


Рис. 1. Динамика прироста биомассы на носителях, г/г носителя: МФ – мелкая фракция хлопьев рециклированного ПЭТ, ПП1 – лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок после промывки бутылок и обработки щёлочью, ПП2 – исходные лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок, УСНБ – углеродно-синтетический носитель биомассы

Fig. 1. Dynamics of biomass growth on carrier, g/g of carrier: FF – fine fraction of recycled PET flakes, PP1 – light fraction of PET bottle recycling waste after bottle washing and alkali treatment, PP2 – original light fraction of PET bottle recycling waste, CSBC – carbon-synthetic biomass carrier

Таблица 3 / Table 3

Органолептические свойства активного ила и очищенных сточных вод, баллы
Organoleptic properties of activated sludge and treated wastewater, points

Показатель Indicator	Вариант эксперимента / An experimental version				
	ОСВ-1 TWW-1	ОСВ-2-МФ TWW-2-FF	ОСВ-2-ПП1 TWW-2-PP1	ОСВ-2-ПП2 TWW-2-PP2	ОСВ-2-УСНБ TWW-2-CSBC
Запах, баллы Odor, points	4	3	3	2	2
Прозрачность воды, см Water transparency, cm	15	18	23	30	30

Примечание: 1. Баллы: 1 – очень слабый, 2 – слабый, 3 – заметный, 4 – отчётливый, 5 – очень сильный. 2. Здесь и в табл. 3, 5–7, рис. 3: ОСВ – сточные воды, очищенные с помощью: ОСВ-1 – свободноплавающих микроорганизмов активного ила; ОСВ-2-МФ – мелкой фракции хлопьев рециклированного ПЭТ; ОСВ-2-ПП1 – лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок в виде этикеток, обработанных раствором щёлочи при промывке; ОСВ-2-ПП2 – исходных этикеток с бутылок; ОСВ-2-УСНБ – углеродно-синтетического носителя биомассы.

Note: 1. Points: 1 – very weak, 2 – weak, 3 – noticeable, 4 – distinct, 5 – very strong. 2. Here and in Tables 3, 5–7, Fig. 3: TWW – wastewater treated by: TWW-1 – free-floating activated sludge microorganisms; TWW-2-FF – fine fraction of recycled PET flakes; TWW-2-PP1 – light fraction of PET bottle recycling waste in the form of labels treated with alkali solution during washing; TWW-2-PP2 – original labels from bottles; TWW-2-CSBC – carbon-synthetic biomass carrier.

чению общего количества видов свободноплавающих микроорганизмов активного ила с 16 до 30, к повышению частоты их встречаемости в свободноплавающем активном иле (табл. 4) и к изменению физиологического состояния ресничных инфузорий и коловраток от неудо-

влетворительного (рис. 4а, см. цв. вкладку I) в свободноплавающем иле до удовлетворительного (рис. 4б, см. цв. вкладку I) на носителях биомассы.

Проведённый рентгеноспектральный анализ элементного состава иммобилизованных



Рис. 2. Внешний вид биоплёнки на углеродно-синтетическом носителе биомассы
Fig. 2. Biofilm on the carbon-synthetic biomass carrier appearance



Рис. 4. Состояние инфузорий *Opercularia* sp. (увеличение $\times 600$): а) свободно-плавающего ила, б) на носителях биомассы / Fig. 4. *Opercularia* sp.: a) in free-floating sludge, b) on biomass carriers (magnification $\times 600$)

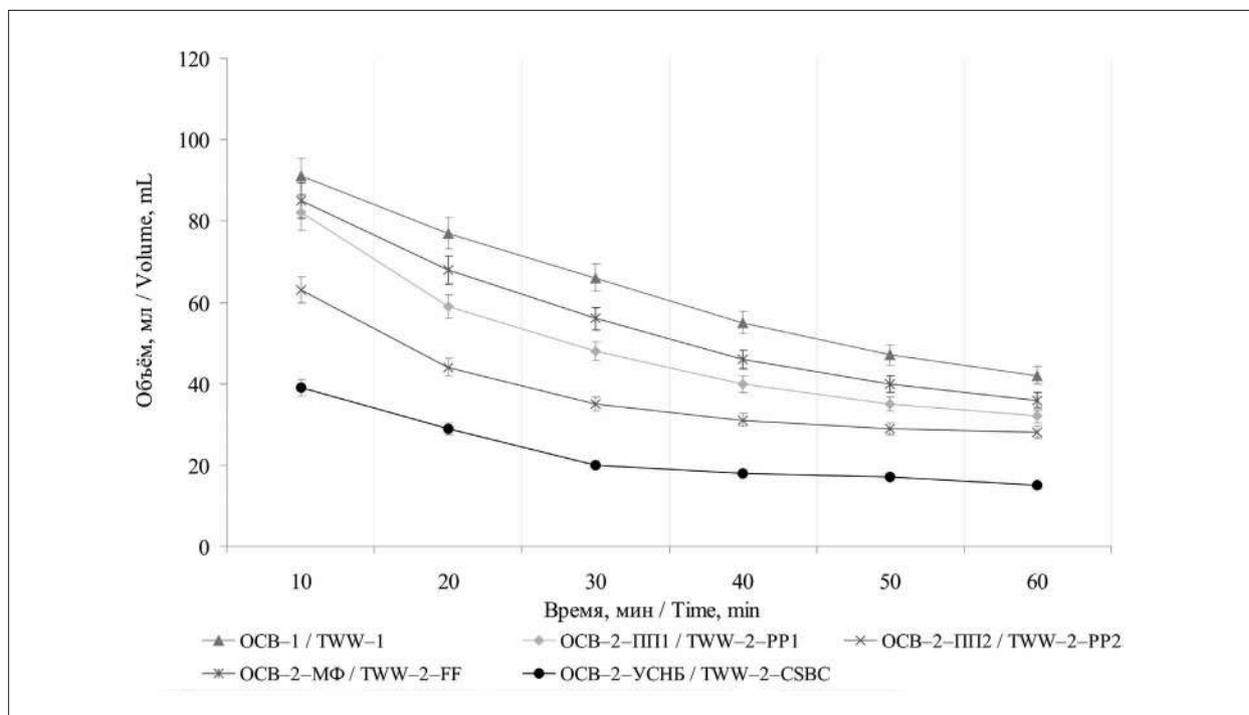


Рис. 3. Динамика оседания активного ила / Fig. 3. Activated sludge settling dynamics

Таблица 4 / Table 4

Частота встречаемости различных видов микроорганизмов в активном иле, баллы
Frequency of occurrence of various types of microorganisms in activated sludge, points

Микроорганизмы Microorganisms	Время использования носителя 24 / 96 ч / Media usage time 24 / 96 hours				
	Вариант эксперимента / An experimental version				
	OCB-1 TWW-1	OCB-2-МФ TWW-2-FF	OCB-2-ПП1 TWW-2-PP1	OCB-2-ПП2 TWW-2-PP2	OCB-2-УСНБ TWW-2-CSBC
Первый трофический уровень / The first trophic level					
<i>Beggiatoa alba</i>	1 / 1	1 / 3	2 / 2	3 / 3	1 / 2
<i>Zoogloea ramigera</i>	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
<i>Actinomycetales</i> sp.	2 / 1	2 / 2	2 / 2	2 / 1	2 / 2
Второй трофический уровень / The second trophic level					
Жгутиковые <i>Flagellates Bodo</i> sp.	1 / 1	1 / 2	2 / 2	2 / 1	2 / 2
<i>Euglypha</i> sp.	1 / 1	1 / 1	1 / 2	1 / 2	1 / 2
<i>Arcella</i> sp.	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 2
<i>Centropyxis</i> sp.	2 / 1	2 / 1	2 / 2	2 / 2	1 / 2
Третий трофический уровень / The third trophic level					
<i>Litonotus</i> sp.	1 / 1	1 / 2	2 / 1	2 / 2	2 / 2
<i>Aspidisca</i> sp.	2 / 2	2 / 3	2 / 4	2 / 4	2 / 4
<i>Opercularia</i> sp.	1 / 1	1 / 1	2 / 1	2 / 2	2 / 2
<i>Vaginicola</i> sp.	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	2 / 2
<i>Philodina</i> sp.	1 / 1	1 / 1	2 / 1	2 / 2	3 / 3

Примечание: оценку частоты встречаемости в баллах см. в таблице 2.

Note: for the frequency of occurrence in points, see Table 2.

на УСНБ микроорганизмов показал соответствие составу бактериальных клеток (табл. 5).

Применение для очистки нефтезагрязнённых СВ кроме свободноплавающих микроорганизмов активного ила закреплённых на носителях микроорганизмов привело к снижению и стабилизации значений илового индекса, а также, повышению эффективности очистки СВ от органических соединений, в том числе нефтепродуктов (табл. 6).

Присутствие в составе ОПТ НСО пироглерода позволяет полагать, что в процессе очистки с использованием УСНБ протекают процессы биосорбции [6, 18].

Эффективность иммобилизации микроорганизмов активного ила на УСНБ была подтверждена методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 5).

Использование УСНБ повышает эффективность процесса биологической очистки СВ, содержащих трудноокисляемые органические компоненты, по показателю химическое потребление кислорода (ХПК) на 17 % и содержание нефтепродуктов на 7 % относительно эффективности процесса биологической очистки сточных вод свободноплавающим активным илом. Полученные результаты со-

поставимы с результатами при реализации процесса биосорбции [8, 12].

Применение в качестве носителя биомассы лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок позволяет достичь эффективности удаления органических веществ по ХПК до 90 % за 4–6 ч при температуре 20÷22 °С. При использовании других видов пластика и более высокой температуры указанная эффективность достигается за 19 ч [8].

Наиболее эффективна очистка нефтезагрязнённых сточных вод при использовании в качестве носителя закреплённой биомассы необработанной лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок и УСНБ. Применение носителей биомассы на основе рассматриваемых вторичных ресурсов позволяет повысить эффективность очистки трудноокисляемых СВ от органических веществ, в том числе нефтепродуктов, в 2,5–3,0 раза.

Использование в качестве носителя закреплённой биомассы УСНБ позволяет сформировать нитрифицирующий биоценоз активного ила, что подтверждается снижением содержания в очищенной СВ соединений азота: ионов аммония, нитрит-ионов и нитрат-ионов (табл. 7).

Таблица 5 / Table 5

Элементный состав иммобилизованных микроорганизмов
Elemental composition of immobilised microorganisms

Элемент / Element	Содержание, мас. сух. в-ва, % / Content, wt. dry wt. %
Углерод / Carbon	17,3 ± 0,9
Кислород / Oxygen	41,7 ± 2,1
Алюминий / Aluminum	0,390 ± 0,020
Фосфор / Phosphorus	0,640 ± 0,032
Кальций / Calcium	40,1 ± 2,0

Таблица 6 / Table 6

Эффективность очистки сточных вод от органических соединений
Efficiency of wastewater treatment from organic compounds

Показатель Indicator	Вариант эксперимента / An experimental version				
	ОСВ-1 TWW-1	ОСВ-2-МФ TWW-2-FF	ОСВ-2-ПП1 TWW-2-PP1	ОСВ-2-ПП2 TWW-2-PP2	ОСВ-2-УСНБ TWW-2-CSBC
Иловый индекс Sludge index	156 ± 8	133 ± 7	127 ± 6	98 ± 5	90 ± 5
Эффективность очистки по содержанию нефтепродуктов, % Treatment efficiency for oil content, %	90 ± 5	91 ± 5	94 ± 5	96 ± 5	97 ± 5
Эффективность очистки по величине химического потребления кислорода, % Treatment efficiency for chemical oxygen demand, %	75,0 ± 3,8	88 ± 4	89 ± 5	90 ± 5	92 ± 5

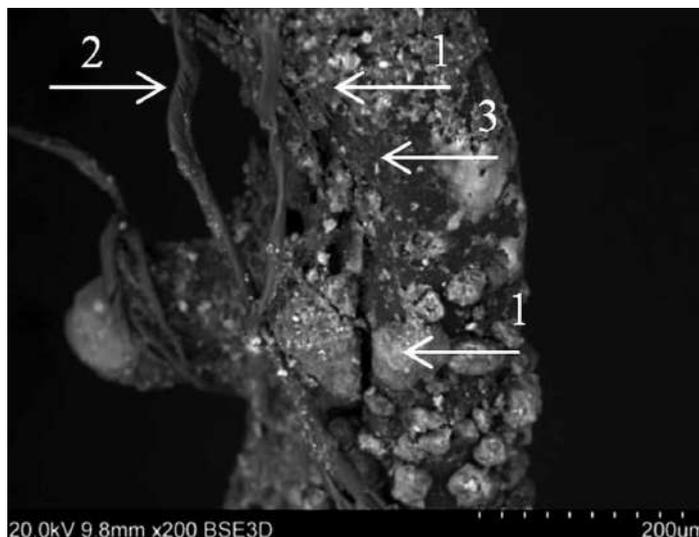


Рис. 5. Внешний вид биомассы микроорганизмов, иммобилизованных на углеродно-синтетическом носителе (увеличение $\times 200$):
 1) биомасса микроорганизмов активного ила; 2) термообработанный полиэтилен низкого давления;
 3) остатки после термодесорбции нефтесодержащих отходов
Fig. 5. Appearance of microorganism biomass immobilized on a carbon-synthetic carrier (magnification $\times 200$): 1) microorganism biomass from activated sludge;
 2) heat-treated low-pressure polyethylene;
 3) residues after thermal desorption of oil-containing waste

Таблица 7 / Table 7

Содержание в очищенной сточной воде соединений азота
 Content of nitrogen compounds in treated wastewater

Показатель / Indicator	Концентрация, мг/дм ³ / Concentration, mg/dm ³		
	Вариант эксперимента / An experimental version		
	СВ / WW	ОСВ-1 / TWW-1	ОСВ-2-УСНБ / TWW-2-CSBC
Нитрат-ион / Nitrate ion	0,19 ± 0,06	0,27 ± 0,09	6,8 ± 1,5
Нитрит-ион / Nitrite ion	0,140 ± 0,020	0,094 ± 0,018	0,020 ± 0,004
Ионы аммония / Ammonium ions	10,8 ± 2,3	6,7 ± 1,4	0,35 ± 0,12

Примечание: СВ – исходные сточные воды.
 Note: WW – raw wastewater.

Таблица 8 / Table 8

Эффективность использования различных типов носителей закреплённой биомассы
 Efficiency of using different types of fixed biomass carriers

Эффективность / Efficiency	УСНБ / CSBC	МФ, ПП1, ПП2 FF, PP1, PP2	Синтетический волокнисто-пористый нетканый материал / Synthetic fibre-porous nonwoven material [22]	Пенополипропиленовые ерши / Polypropylene foam ruffs [4]	Гранулы полиэтилена высокого давления / High-pressure polyethylene granules [4]
По ХПК, % / COD removal, %	92	85–90	80	85–90	90–95
По нефтепродуктам, % / Oil product removal, %	96,7	90	75	80–85	90

Применение в составе носителей биомассы пластиков может привести к формированию вторичных загрязнений очищенных СВ микропластиками [19–21]. Оценка потенциальных эмиссий микропластика из мелкой фракции хлопьев рециклированного ПЭТ с использованием светового микроскопа при увеличении $\times 1000$ показала их отсутствие после 60-кратного применения загрузки.

Углеродно-синтетический носитель биомассы на основе остатков после термодесорбции НСО и отходов ПНД характеризуется эффективностью очистки СВ от органических веществ на уровне известных аналогов (табл. 8), но при этом наиболее эффективно удаляет нефтепродукты. Применение УСНБ на типовом нефтеперерабатывающем заводе позволяет снизить величину экологического ущерба на 1 627 389,82 руб/год.

Использование УСНБ в качестве носителя закреплённой биомассы в системах биологической очистки СВ сложного состава позволяет получать носитель биомассы полностью из отходов и вовлекать в оборот неиспользуемые в настоящее время отходы пиролиза нефтесодержащих отходов.

Заключение

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что прирост биомассы на носителях из вторичных ресурсов происходит в течение 10–14 сут. и биомасса остаётся стабильной в течение 20–25 сут.

Использование в качестве носителя закреплённой биомассы необработанной лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок и УСНБ способствует формированию стабильного биоценоза активного ила, обеспечивающего:

- улучшение органолептических свойств активного ила и очищенных сточных вод,
- стабилизацию значений илового индекса и приближение его к рекомендуемым диапазонам,
- повышение видового разнообразия микроорганизмов свободноплавающего ила и улучшение их физиологического состояния,
- повышение эффективности очистки трудноокисляемых сточных вод и снижение содержания в очищенных сточных водах органических веществ, в том числе нефтепродуктов, в 2,5–3 раза,
- снижение содержания в очищенной сточной воде ионов аммония на 94 %, нитрит-ионов на 79 %.

Литература

1. Шлёкова И.Ю., Кыш А.И. Повышение эффективности аэробной биологической очистки нефтесодержащих сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 203–209. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209
2. Ильина Т.С., Романова Ю.М., Гинцбург А.Л. Биоплёнки как способ существования бактерий в окружающей среде и организме хозяина: феномен, генетический контроль и системы регуляции их развития // Генетика. 2004. Т. 40. № 11. С. 1445–1456.
3. Куликов М.И., Зубов, Г.М., Зубов М.Г., Попов Д.В. Биореактор доочистки биологически очищенных сточных вод // Патент RU 95331 U1. Заявление: 2010107913/22, 03.03.2010. Дата публикации: 27.06.2010. Бюлл. 18.
4. Анфимова Ю.В. Снижение негативного воздействия станций биологической очистки нефтезагрязнённых сточных вод на объекты окружающей среды // Экология и промышленность России. 2008. № 6. С. 34–37.
5. Колесников В.П., Колесников Д.В. Установка для биохимической очистки сточных вод // Патент RU 2422379 С1. Заявление: 2009143268/05, 23.11.2009. Дата публикации: 27.06.2011. Бюлл. 18.
6. Muliyadi M., Purwanto P., Sumiyati S., Retnaningsih Soeprbowati T. Removal of pollutants in wastewater using plastic-based media biofiltration: a meta-analysis // Pollution. 2023. V. 9. No. 1. P. 421–432. doi: 10.22059/POLL.2022.349305.1642
7. Шелкунова М.В. Разработка материала-носителя биомассы из высоконаполненного микроцеллюлозой ПВД // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 3. С. 192–194. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-192-194
8. Güneş Y. Inhibition of boric acid and sodium borate on the biological activity of microorganisms in an aerobic biofilter // Environ. Technol. 2013. V. 34. No. 9–12. P. 1117–1121. doi: 10.1080/09593330.2012.736540
9. Dorji U., Dorji P., Shon H., Badeti U., Dorji C., Wangmo C., Tijing L., Kandasamy J., Vigneswaran S., Chanan A., Phuntsho S. On-site domestic wastewater treatment system using shredded waste plastic bottles as biofilter media: pilot-scale study on effluent standards in Bhutan // Chemosphere. 2022. No. 286. Pt. 2. Article No. 131729. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131729
10. Juniarta P.S., Budiarsa Suyasa I.W., Sila Dharma IGB. Effectiveness of biofilter made from plastic waste to decrease BOD, COD and ammonia of hospital wastewater // ECOTROPIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science). 2018. V. 12. No. 1. P. 1–8. doi: 10.24843/EJES.2018.v12.i01.p01
11. Zeng M., Soric A., Ferrasse J.H., Roche N. Interpreting hydrodynamic behaviour by the model of stirred tanks in series with exchanged zones: preliminary study in lab-scale trickling filters // Environ. Technol. 2013. V. 34. No. 18. P. 2571–2578. doi: 10.1080/09593330.2013.781199

12. Шлёкова И.Ю., Кныш А.И. Интенсификация биологической очистки производственных сточных вод в аэротенках с помощью адсорбентов // *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 6. С. 20–25. doi: 10.18412/1816-0395-2018-6-20-25

13. Самков А.А., Волченко Н.Н., Худокормов А.А., Самкова С.М., Карасева Э.В. Оптимизация условий иммобилизации микробных клеток при создании био-препаратов для биодegradации углеводов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 1. С. 194–202. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-194-202

14. Полыгалов С.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Станиславлевич Н. Оценка эффективности раздельного сбора ПЭТ-бутылок с использованием уличных контейнеро-сеток // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 11. С. 55–59. doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-55-59

15. Калинина Е.В. Использование материального ресурса твёрдых остатков пиролиза нефтесодержащих отходов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2022. № 5. С. 40–46. doi: 10.33285/2411-7013-2022-5(308)-40-46

16. Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Оценка жиз-ненного цикла методов обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов нефтеперерабатывающих предприятий // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 12. С. 38–43. doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-38-43

17. Рекомендации по проведению гидробиологиче-ского контроля на сооружениях биологической очистки с аэротенками. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2004. 52 с.

18. Nurullina E.N., Sirotkin A.S., Ponkratova S.V., Shaginurova G.I., Emelyanov V.M. Intensification of biological oxidation of contaminants in the biosorption systems for wastewater purification // *Biotechnology in Russia*. 2002. No. 1. P. 45–51.

19. Carr S.A., Liu J., Tesoro A.G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants // *Water Res.* 2016. V. 91. P. 174–182. doi: 10.1016/j.watres.2016.01.002

20. Gatidou G., Arvaniti O.S., Stasinakis A.S. Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treat-ment Plants // *J. Hazard. Mater.* 2019. V. 367. P. 504–512. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.081

21. Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M.C.M., Ni B.J. Microplastics in wastewater treatment plants: detec-tion, occurrence and removal // *Water Res.* 2019. V. 152. P. 21–37. doi: 10.1016/j.watres.2018.12.050

22. Савицкий Н.Е., Лисицын В.Л., Кравцов А.Г. Носитель биомассы фильтров для биологической очистки сточных вод // Патент ЕА 007088 В1. Заявление: ЕА 200500433 А, 30.03.05. Дата публикации: 30.06.06.

References

1. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Improving the efficiency of aerobic biological treatment of oily wastewater // *Theo-*

retical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209

2. Ilina T.S., Romanova Yu.M., Gintsburg A.L. Biofilms as a mode of existence of bacteria in external environment and host body: phenomenon, genetic control, and regulation systems of development // *Genetics*. 2004. V. 40. No 11. P. 1445–1456 (in Russian).

3. Kulikov M.I., Zubov G.M., Zubov M.G., Popov D.V. Bioreactor for additional treatment of biologically treated wastewater // Patent RU 95331 U1. Application: 2010107913/22, 03.03.2010. Date of publication: 27.06.2010. Bull. 18 (in Russian).

4. Anfimova Yu.V. Reduction of the negative influ-ence of the biological treatment stations of the oil-polluted wastewater on the environmental objects // *Ecology and Industry of Russia*. 2008. No. 6. P. 34–37 (in Russian).

5. Kolesnikov V.P., Kolesnikov D.V. Effluents bio-chemical treatment plant // Patent RU 2422379 C1. Ap-plication: 2009143268/05, 23.11.2009. Date of publication: 27.06.2011. Bull. 18 (in Russian).

6. Mulyadi M., Purwanto P., Sumiyati S., Retnaning-sih Soeprbowati T. Removal of pollutants in wastewater using plastic-based media biofiltration: a meta-analysis // *Pollution*. 2023. V. 9. No. 1. P. 421–432. doi: 10.22059/POLL.2022.349305.1642

7. Shelkunova M.V. Development of biomass carrier material from high-filled with microcellulose LDPE // *Proceedings of VSUET*. 2019. V. 81. No. 3. P. 192–194 (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-192-194

8. Güneş Y. Inhibition of boric acid and sodium borate on the biological activity of microorganisms in an aerobic biofilter // *Environ. Technol.* 2013. V. 34. No. 9–12. P. 1117–1121. doi: 10.1080/09593330.2012.736540

9. Dorji U., Dorji P., Shon H., Badeti U., Dorji C., Wangmo C., Tijing L., Kandasamy J., Vigneswaran S., Chanan A., Phuntsho S. On-site domestic wastewater treatment system using shredded waste plastic bottles as biofilter media: pilot-scale study on effluent standards in Bhutan // *Chemosphere*. 2022. No. 286. Pt. 2. Article No. 131729. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131729

10. Juniarta P.S., Budiarsa Suyasa I.W., Sila Dharma I. Effectiveness of biofilter made from plastic waste to de-crease bod, cod and ammonia of hospital wastewater // *ECOTROPHIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*. 2018. V. 12. No. 1. P. 1–8 (in Indonesian). doi: 10.24843/EJES.2018.v12.i01.p01

11. Zeng M., Soric A., Ferrasse J.H., Roche N. Inter-preting hydrodynamic behaviour by the model of stirred tanks in series with exchanged zones: preliminary study in lab-scale trickling filters // *Environ. Technol.* 2013. V. 34. No. 18. P. 2571–2578. doi: 10.1080/09593330.2013.781199

12. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Intensification of bio-logical treatment of industrial wastewater in aeration tanks using adsorbents // *Ecology and Industry of Russia*. 2018. V. 22. No. 6. P. 20–25 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-6-20-25

13. Samkov A.A., Volchenko N.N., Khudokormov A.A., Samkova S.M., Karaseva E.V. Optimization of the conditions of microbial cells immobilization for the creation of hydrocarbons-degrading biopreparations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 194–202 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-194-202
14. Polygalov S.V., Il'inykh G.V., Korotaev V.N., Stanisavlevich N. Evaluation of the effectiveness of separate collection of PET bottles using street container-baskets // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. V. 23. No. 11. P. 55–59 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-55-59
15. Kalinina E.V. Use of material resource of solid residues of oil-containing waste pyrolysis // *Environmental protection in oil and gas complex*. 2022. No. 5. P. 40–46 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2022-5(308)-40-46
16. Kalinina E.V., Rudakova L.V. Life cycle assessment of the management and disposal of oil-containing wastes from refineries // *Ecology and Industry of Russia*. 2021. V. 25. No. 12. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-38-43
17. Guidelines for hydrobiological control at biological treatment facilities with aeration tanks. Perm: Perm State Technical University Publishing House, 2004. 52 p. (in Russian).
18. Nurullina E.N., Sirotkin A.S., Ponkratova S.V., Shaginurova G.I., Emelyanov V.M. Intensification of biological oxidation of contaminants in the biosorption systems for wastewater purification // *Biotechnology in Russia*. 2002. No. 1. P. 45–51.
19. Carr S.A., Liu J., Tesoro A.G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants // *Water Res*. 2016. V. 91. P. 174–182. doi: 10.1016/j.watres.2016.01.002
20. Gatidou G., Arvaniti O.S., Stasinakis A.S. Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treatment Plants // *J. Hazard. Mater*. 2019. V. 367. P. 504–512. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.081
21. Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M.C.M., Ni B.J. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal // *Water Res*. 2019. V. 152. P. 21–37. doi: 10.1016/j.watres.2018.12.050
22. Savitskiy N.E., Lisitsyn V.L., Kravtsov A.G. Filter biomass carrier for biological treatment of sewage water // Patent EA 007088 B1. Application: EA 200500433 A, 30.03.05. Date of publication: 30.06.06 (in Russian).

Инновационный подход к созданию композитных покрытий с применением вторичных ресурсов промышленности

© 2026. С. Л. Фукс, к. т. н., доцент,
К. О. Камалов, ст. преподаватель,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr00705@vyatsu.ru

Современные промышленные производства, такие как машиностроение и авиастроение, широко используют химические и гальванические покрытия, что приводит к образованию значительных объёмов сточных вод, загрязнённых тяжёлыми металлами, щелочами и кислотами, и создаёт серьёзную экологическую проблему. Для обеспечения экологической безопасности необходимо разработать эффективный метод снижения содержания тяжёлых металлов в окружающей среде. Предлагается использовать концентрированные сточные воды химического никелирования и твёрдые отходы, в частности, золу уноса теплоэлектростанций, превращая их в ценный компонент для создания композитного покрытия. Актуальность разработки обусловлена последовательностью получения дисперсной фазы взаимодействием золы уноса с жидким отходом химического никелирования и использованием её в композитных покрытиях. В процессе обработки золы уноса в отработанных растворах химического никелирования осуществляется активация, сопровождающаяся образованием металлических частиц никеля на её поверхности. Целью исследования является получение композитного покрытия никель–зола уноса с использованием мелкодисперсной фракции золы уноса. Полученная дисперсная фаза (ДФ) вводится в электролиты электрохимического никелирования, формируя композитное электрохимическое покрытие (КЭП) никель–(активированная) зола уноса. Композиционные покрытия демонстрируют повышение микротвёрдости, снижение внутренних напряжений и повышение износостойкости по сравнению с традиционными никелевыми покрытиями. Полученные результаты позволяют повторно использовать промышленные отходы, сократить экологическую нагрузку и улучшить эксплуатационные характеристики композитных покрытий.

Ключевые слова: зола уноса, никелирование, композиционные материалы, покрытие, микротвёрдость.

An innovative approach to the composite coatings creation using industrial waste resources

© 2026. S. L. Fuchs ORCID: 0000-0002-9238-0000
K. O. Kamalov ORCID: 0000-0002-5347-4643
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr00705@vyatsu.ru

Environmental hazard of machinery production and aircraft industry can be reduced by reutilization of electrolytes for deposition of composite electrochemical coatings with enhanced physical properties. Specifically, composites consisting of the nickel matrix and dispersed phase can be obtained. The dispersed phase consists of micro- and nanoparticles which improves coating appearance and enhances performance parameters. Fly ash is formed during the combustion of solid fuel in the Thermal Power Plant (TPP). It is promising as dispersed phase because it consists of spherical particles of various diameters. The fly ash activation in the disposal solution of chemical-nickel plating causes an increase in particle size and weight due to the reduction of nickel over the particle surface and in agglomerates. The TPP-5 (Kirov, Russian Federation) fly ash is used in this study to obtain “nickel-activated fly ash” composite electrochemical coatings (CEC). The introduction of the fly ash coated with chemically-deposited nickel into the matrix obtained by electrochemical plating of nickel is shown to form the CEC with improved wear resistance due to the reduction of internal stresses and the absence of delamination. Dispersed particles embedded into the nickel matrix change its morphology and mechanical characteristics of the coating without changing the appearance. The obtained results demonstrate that the most promising combination for obtaining CEC is the following: the disposal nickel-plating electrolyte containing nickel-coated magnetic fraction of the fly ash with the particle size below 125 µm. The application of the disposal nickel-plating electrolyte solution with a low nickel concentration for fly ash activation makes liquid waste processing easier and cheaper.

Keywords: fly ash, nickel plating, composite materials, coating, microhardness.

Для получения современных качественных изделий широкое применение в машиностроении, авиастроении и других отраслях промышленности нашли химические и гальванические покрытия. В результате деятельности производств, наряду с совершенствованием технологий, образуются многотоннажные сточные воды и твёрдые отходы, загрязняющие поверхностные водные объекты и территории солями тяжёлых металлов (ТМ), щелочами и кислотами. При утилизации больших объёмов жидких отходов гальванических производств необходимы специальные установки для их переработки и реагенты для осаждения ТМ.

Для изготовления изделий специального назначения применяется химическое осаждение никеля из разбавленных растворов солей никеля и восстановителя. В то же время, для обеспечения коррозионной стойкости поверхности изделий используется гальваническое никелевое покрытие, наносимое из концентрированных растворов.

Снижение экологической опасности производств возможно в результате повторного применения электролитов для получения композиционных покрытий металла с новыми физическими свойствами. К ним относятся композиты, состоящие из никелевой матрицы и твёрдой дисперсной фазы (ДФ). Дисперсная фаза, состоящая из микро- и наночастиц различных химических веществ, служит для улучшения эксплуатационных характеристик покрытий, что расширяет диапазон использования этих материалов [1].

В качестве ДФ используются вещества без изменения химического состава: оксид алюминия, оксид кремния, графит, а также продукт процесса сжигания твёрдого топлива в котлах электростанций – зола уноса.

Для получения матрицы композита применяются отработанные электролиты с изменённым составом. К ним относятся никельсодержащие растворы, потерявшие часть технологических свойств и подлежащие утилизации.

Технологии переработки жидких отходов, содержащих ТМ, описаны в работах [2–6]. В работе [2] показано, что извлечение ионов ТМ из сточных вод, шламов и отработанных технологических растворов промышленных предприятий объясняется необходимостью защиты окружающей среды, а также ценностью этих металлов. Процесс переработки растворов является малоизученным и затратным. Авторами работ [3–5] разработаны условия очистки никельсодержащих сточных вод

и извлечения солей никеля из этих растворов. Установлено, что эффективным способом является регенерация отработанных растворов [6]. Извлечённый никель можно применять при нанесении на металлическую поверхность композиционного электрохимического покрытия, повышающего механические свойства поверхности изделий [7–9]. Оптимальным методом утилизации раствора никелирования является выделение никеля на металлическом катоде [10]. Применение золы уноса в качестве ДФ при получении композиционного электрохимического покрытия является одним из способов её утилизации [11–15].

В соответствии с данными о лимитирующих признаках вредности (ЛПВ), никель токсичен для водных объектов рыбохозяйственного назначения, для которых $ПДК_{р.х.} = 0,01$ мг/дм³, класс опасности 3. С учётом этих характеристик разработка условий повторного использования растворов, содержащих соли никеля, является актуальной задачей.

В связи с этим целью исследования являлось получение композитного покрытия никель–зола уноса с использованием мелкодисперсной фракции золы уноса.

Объекты и методы исследования

При сжигании твёрдого топлива в котельном агрегате теплоэлектростанций (ТЭЦ) с отходящим дымовым газом удаляется мелкодисперсный минеральный остаток – зола уноса. Разделение частиц золы уноса на фракции осуществлялось на виброгрохоте (ВИБРОТЕХНИК, Россия) с размером ячеек сит от 1200 до 90 мкм. В полученных фракциях золы уноса определялись магнитная и немагнитная составляющие с использованием постоянных магнитов, последующей промывкой водой от растворимых примесей, фильтрацией и сушкой в термостате (СНОЛ, Россия) при температуре 105 °С. Для взвешивания золы уноса, компонентов при приготовлении растворов и образцов металлов до и после нанесения покрытий применялись электронные весы марки ViBRA HT (Россия). С целью изучения морфологии поверхности частиц и её состава использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) со встроенным детектором энергодисперсионного анализа (ЭДА) марки JSM-6510LV (JEOL, Япония). При определении микротвёрдости применялся металлографический микроскоп марки ПМТ-3М. Аналитический контроль состава

никельсодержащих растворов осуществлялся комплексонометрическим методом.

Для нанесения никеля на поверхность латунных изделий использовался раствор химического никелирования, приготовленный из реактивов марки ч.д.а. путём растворения в дистиллированной воде сульфата никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 25–30 г/дм³, с добавлением уксусной кислоты CH_3COOH 4,4–5 г/дм³, буферной добавки ацетата натрия CH_3COONa 13 г/дм³ (для поддержания величины рН 4,0–4,5) и гипофосфита натрия $\text{Na}(\text{H}_2\text{PO}_2)$ 15 г/дм³ для восстановления никеля по реакции: $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}^0$. Процесс протекал при температуре 95 °С в течение 1 ч. В отработанном растворе химического никелирования содержание Ni^{2+} снижалось до 4–5 г/дм³, образовывался фосфит натрия $\text{Na}_2(\text{HPO}_3)$, и повышалась кислотность до рН 3,5–3,7. После добавления в отработанный раствор 7,5 г/дм³ $\text{Na}(\text{H}_2\text{PO}_2)$ осуществлялась обработка частиц золы уноса, образующейся на Кировской ТЭЦ-5. Активирование золы уноса проводилось в течение 1 ч при 90–95 °С и перемешивании 50 г золы уноса с размером частиц 85–24 мкм в растворе объёмом 0,5 дм³. Обработанная зола уноса промывалась дистиллированной водой, высушивалась до постоянной массы, взвешивалась и использовалась при получении композиционного электрохимического покрытия (КЭП).

Композиционное электрохимическое покрытие никель–зола уноса наносилось на поверхность стальных образцов из электролита блестящего никелирования состава: сульфат никеля $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 280 г/дм³, хлорид никеля $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 45 г/дм³, борная кислота H_3BO_3 – 30 г/дм³, сахарин – 1 г/дм³. Режим электролиза: рН 3,5–4,5, плотность тока (D_k) – 2–3 А/дм², температура процесса 50 °С, перемешивание в течение 0,33–3,00 ч. Масса активированной золы уноса в электролите составляла 67–100 г/дм³. Химическое никелирование осуществлялось на образцах латуни марки Л85, а электрохимическое никелирование и КЭП никель–активированная зола уноса в виде дисперсной фазы (ДФ) – на образцах стали марки 45ХН2МФА. Электрохимическая ячейка объёмом 0,8 дм³ состояла из двух никелевых анодов, расположенных у стенок, и стального катода площадью 1 дм² в центре электролизёра.

Результаты и обсуждение

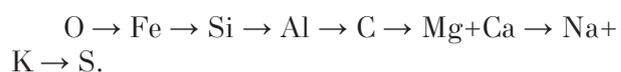
В верхнее сито виброгрохота с максимальным размером ячеек загружалось 500 г

золы уноса. При грохочении последовательно остающиеся на нижних ситах частицы уменьшались в размерах до величины менее 90 мкм. Фракционный состав золы уноса ТЭЦ-5 (г. Киров) представлен в таблице 1. Погрешность определений масс фракций составляла ± 3 %.

Результаты исследований, полученных с использованием СЭМ, представлены на рисунке 1.

Из рисунка 1 видно, что зола уноса преимущественно состоит из сфер различного диаметра и формы, на некоторых сферах имеются отверстия. Это характерно для ценосфер, формирующихся при охлаждении расплава солей и оксидов металлов, находящихся в золе. Средний элементный состав золы уноса, полученный при обработке по результатам расшифровки шести спектров, представлен в таблице 2.

Оказалось, что содержание элементов в золе уноса уменьшается в ряду:



Высокое содержание кислорода связано с присутствием оксидов металлов, находящихся в золе уноса. Наличие небольшого количества серы характерно для гипса – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Значительное количество железа в золе уноса образуется в результате газовой коррозии стальных стенок топки котла при температурах горения угольной пыли (1100–1400 °С). Кремний находится в виде оксида кремния. Другие примеси также состоят из оксидов и силикатов [16, 17].

По разности масс до и после никелирования определялось количество никеля на частицах золы уноса. Результаты химического никелирования поверхности частиц золы уноса представлены в таблице 3. Погрешность определения содержания никеля в растворе составляла ±0,002 г/дм³.

За счёт осаждения никеля на поверхности частиц золы уноса происходит увеличение её массы и кислотности раствора.

Результаты морфологических исследований частиц золы уноса, активированных никелем, представлены на рисунке 2.

Из рисунка 2 видно, что при обработке частиц золы уноса в отходе раствора химического никелирования происходит активное восстановление ионов Ni^{2+} до Ni^0 , что подтверждается появлением металлического блеска (рис. 2а). При контакте с нагретым до 90 °С кислым раствором никелирования не-

Таблица 1 / Table 1

Фракционный состав золы уноса ТЭЦ-5 / Thermal power plant fly ash fractional composition

Размер частиц фракций, мкм Fraction particle size, µm	Масса фракции, г Fraction weight, g	Разделение на составляющие, г Division into components, g	
		немагнитная non-magnetic	магнитная magnetic
1200	6,05	6,00	0,05
450	329,54	206,00	123,54
315	162,52	95,76	66,76
125	0,07	0,07	0,00
90	0,53	0,53	0,00
< 90	1,52	1,49	0,03
Итого / Total	500,23	309,85	190,38

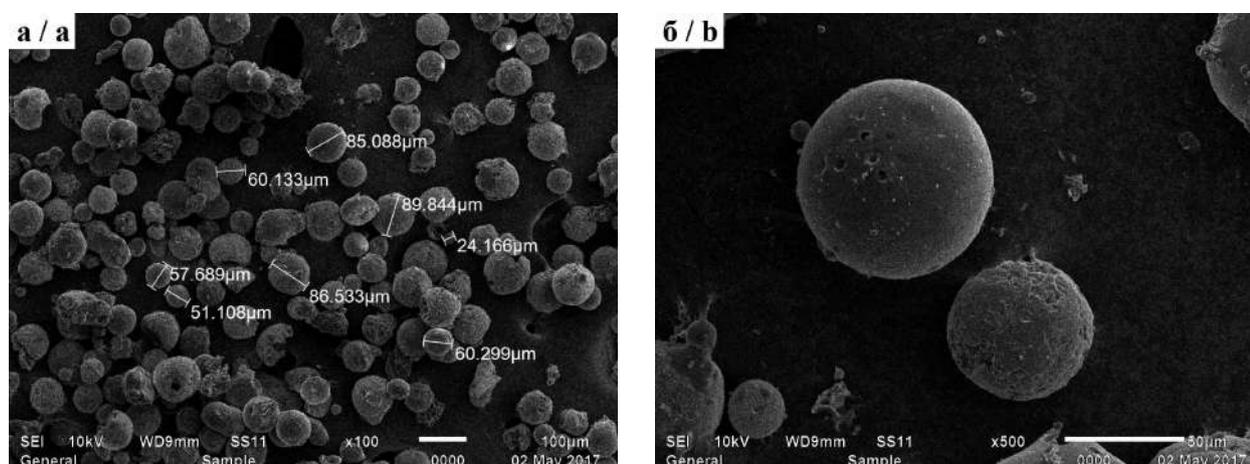


Рис. 1. Морфология золы уноса (90 и < 90 мкм): а – ×100, б – ×1000
Fig. 1. Fly ash particles morphology (90 and < 90 µm): а – ×100, б – ×1000

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав золы уноса ТЭЦ-5 / Elemental composition of Thermal power plant fly ash

Сумма / The amount	Элемент, масс. % / Element, wt. %							
	C	O	Fe	Si	Al	Mg + Ca	Na + K	S
100	7,46	39,42	21,99	17,34	7,98	3,29	1,97	0,55

Таблица 3 / Table 3

Химическое никелирование поверхности частиц золы уноса
Chemical nickel plating of the fly ash particles

Масса Ni в золе уноса, г Ni weight in fly ash, g	Уменьшение [Ni ²⁺] в растворе, г/дм ³ [Ni ²⁺] reduction in solution, g/dm ³	ΔрН	Цвет частиц золы уноса Fly ash particles' color
0,4554	3,166	0,6	светло-серый / light grey
0,4917	0,591	0,8	
0,7979	3,228	1,10	серый / grey
0,8412	2,054	0,90	
0,6466	2,260	0,85	

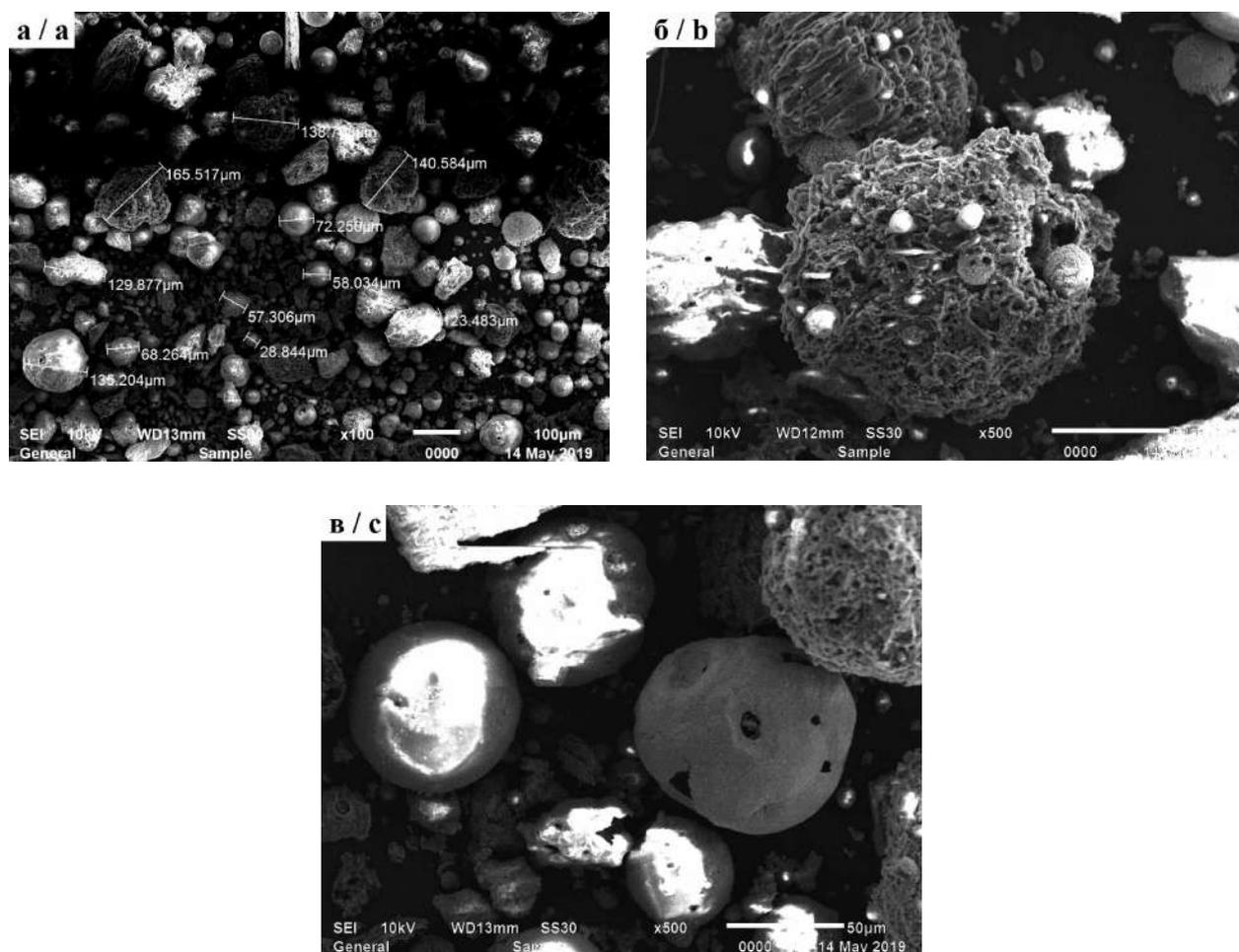


Рис. 2. Морфология золы уноса после обработки раствором химического никелирования (28–125 мкм): а – ×100, б – ×500, в – ×500
Fig. 2. Fly ash particles' morphology after treatment with a chemical nickel plating solution (28–125 µm): а – ×100, б – ×500, с – ×500

Таблица 4 / Table 4

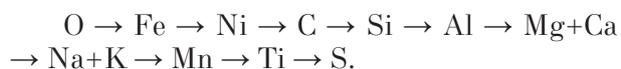
Элементный состав активированной никелем золы уноса / Nickel-activated fly ash composition

Сумма The amount	Элемент, масс. % / Element, wt. %										
	C	O	Fe	Ni	Si	Al	Mg+Ca	Mn	Na+K	Ti	S
100	20,77	32,58	21,99	12,07	6,46	3,12	1,63	0,56	0,52	0,19	0,11

которые ценосферы разрушаются (рис. 2б, в) и на вновь образованной поверхности также происходит восстановление никеля.

Средний элементный состав, активированный никелем золы уноса, определённый по расшифровке шести спектров, представлен в таблице 4.

Результаты обработки спектров, полученных энергодисперсионным анализом, показали, что содержание элементов в золе уноса, обработанной раствором химического никелирования, уменьшается в ряду:



Содержание никеля на поверхности частиц золы уноса составляет 12,07 %. Присутствие щелочных, щёлочноземельных металлов, алюминия снижается более чем в 2 раза, что обусловлено их переходом в нагретый до 50 °С раствор никелирования. При толщине КЭП никель–зола уноса 3,3–4,0 мкм содержание ДФ максимально и составляет 38 %. Затем наблюдается снижение содержания ДФ в покрытии, а при толщине КЭП никель–зола уноса 10–16 мкм вновь возрастает, оставаясь постоянным, 32 %.

Блестящие покрытия металлических изделий должны иметь декоративный вид и повышенную износостойкость. Однако при

длительном использовании прочность сцепления с поверхностью снижается, образуются трещины, сколы и отслоения. Это характерно для покрытий, толщиной 15 мкм и выше [18]. Активированная никелем зола уноса обладает химическим сродством к никелевому покрытию, получаемому электрохимическим способом. Следовательно, её можно применять в качестве ДФ, а в качестве матрицы использовать блестящее никелевое покрытие.

На стали при плотности тока 2 А/дм², времени электролиза 2 ч и постоянном перемешивании получены КЭП никель–зола уноса, толщиной 44,7 мкм. Морфология блестящего никелевого покрытия и КЭП никель–зола уноса, полученных при катодной плотности тока 2 А/дм², приведена на рисунке 3.

При увеличении ×1000 электрохимическое никелевое покрытие равномерное блестящее, имеет внутренние напряжения растяжения, в результате которых на поверхности наблюдаются микротрещины в виде белых полос от механических воздействий при промывке и последующей сушке образца (рис. 3а), в то время как на плоскости образца, покрытого КЭП никель–зола уноса, имеются выпуклости и углубления с заметными неравномерно рас-

положенными частицами золы уноса (рис. 3б). При этом внутренние напряжения растяжения отсутствуют, блеск покрытия сохраняется. Визуальные наблюдения показали также, что КЭП никель–зола уноса имеет неглубокий питтинг (тёмные точки) по границам зёрен. Характеристики электрохимического осаждения никеля при плотности тока 3 А/дм² приведены в таблице 5.

При времени проведения электролиза до 50 мин выход по току никеля возрастает до 97,9 %. Снижение выхода по току никеля с увеличением времени электролиза обусловлено уменьшением содержания ионов никеля в приэлектродном слое электролита [18]. Результаты определения микротвёрдости никелевого покрытия и КЭП никель–зола уноса в зависимости от толщины приведены на рисунке 4.

Полученные данные свидетельствуют о том, что с увеличением толщины никелевого покрытия на стальной подложке в 2,25 раза микротвёрдость возрастает на 25 %, затем снижается, и при толщине 22–27 мкм остаётся постоянной – 0, 216 Н/мкм².

Частицы активированной золы уноса электропроводны и легко осаждаются на ме-

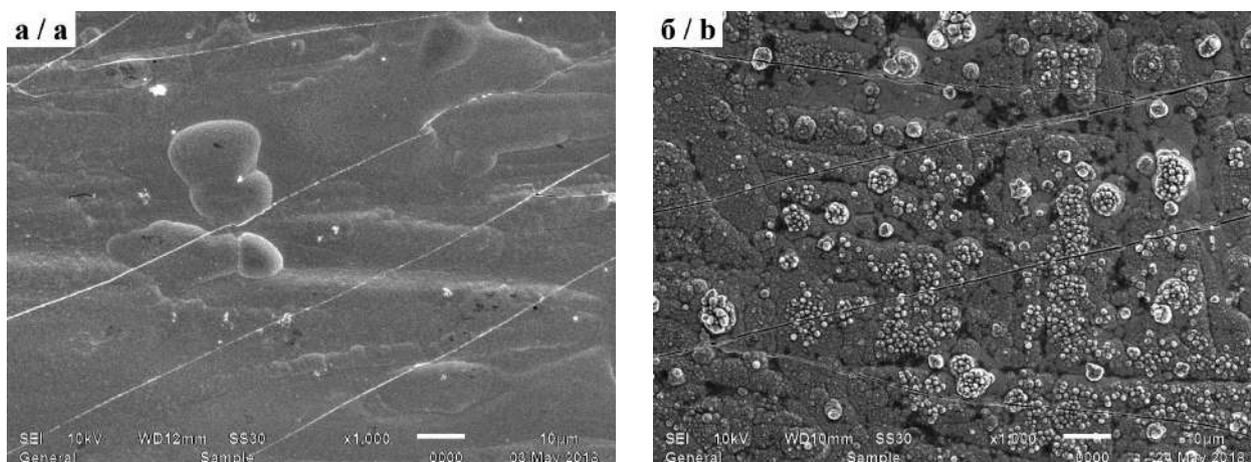


Рис. 3. Морфология блестящего никелевого покрытия (а) и КЭП никель–зола уноса (б). Увеличение ×1000. $D_c = 2 \text{ А/дм}^2$. Толщина 44,7 мкм
Fig. 3. Morphology of the shiny nickel coating (a) and the nickel–fly ash composite electrochemical coating (b). Magnification ×1000. $D_c = 2 \text{ А/дм}^2$. Thickness 44.7 µm

Таблица 5 / Table 5

Характеристики процесса никелирования / Nickel plating characteristics

Время электролиза, мин Electrolysis time, min	Выход по току никеля, % Nickel current output, %
35	90,0 ± 0,3
40	97,0 ± 0,4
50	97,9 ± 0,4
120	96,0 ± 0,3

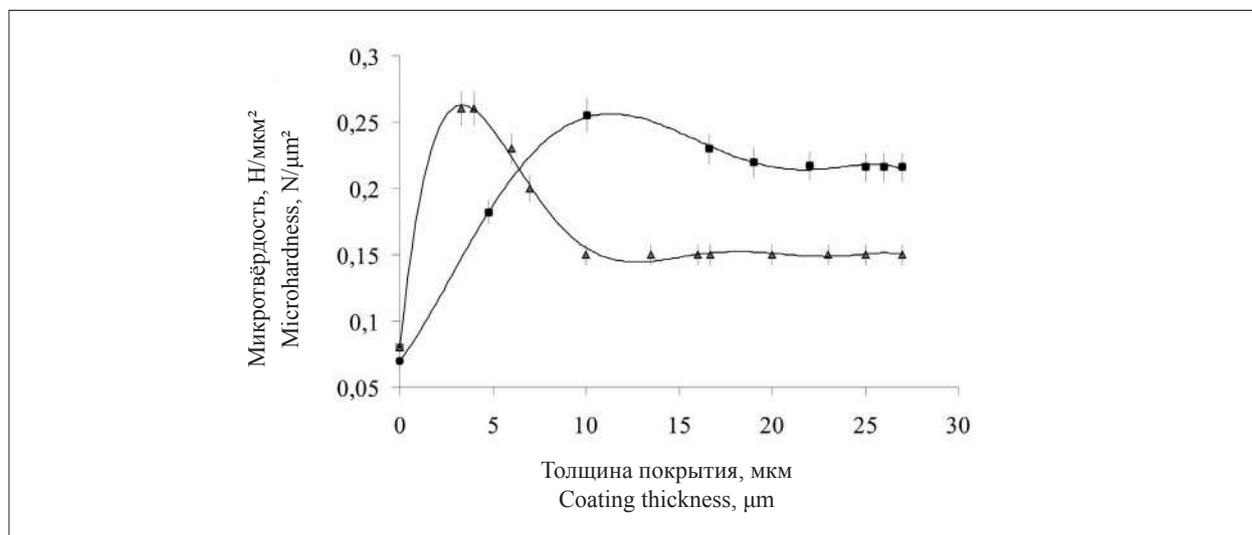


Рис. 4. Зависимость микротвёрдости от толщины никелевого покрытия (●) и КЭП никель–зола уноса (▲)
Fig. 4. Dependence of microhardness on the thickness of the nickel coating (●) and the nickel–fly ash composite electrochemical coating (▲)

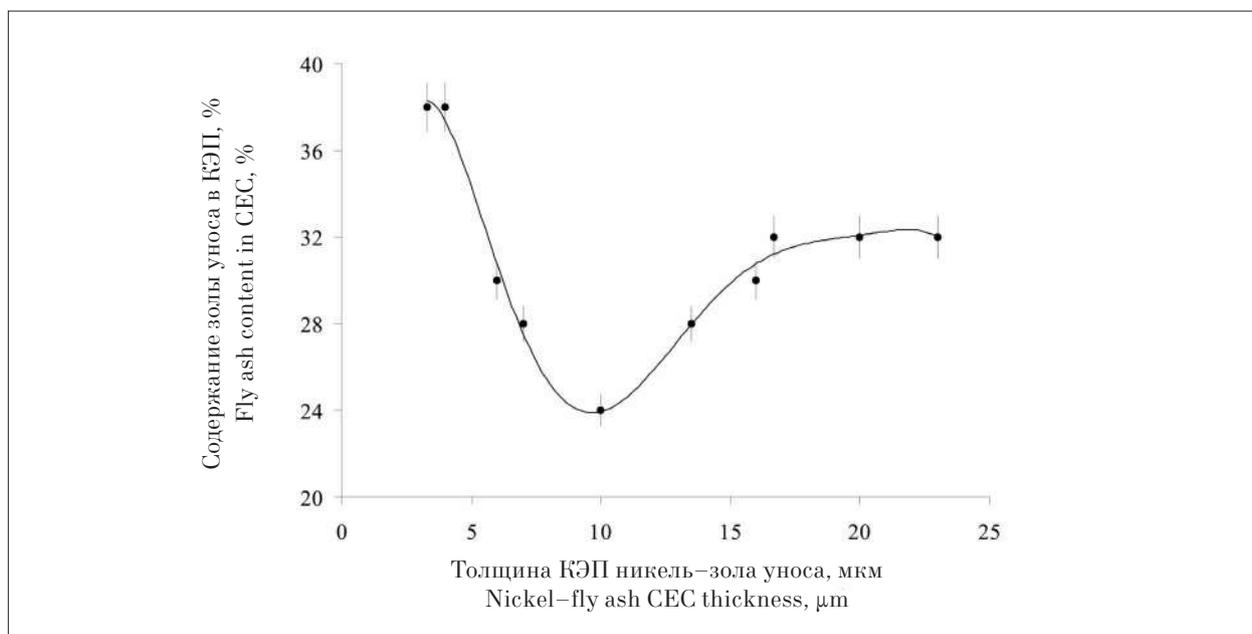


Рис. 5. Зависимость содержания дисперсной фазы в КЭП никель–зола уноса от толщины покрытия
Fig. 5. Dependence of the content of the dispersed phase in the nickel–fly ash composite electrochemical coating (CEC) on the coating thickness

таллической поверхности. При электролизе на активированных частицах золы уноса, находящейся в контакте с поверхностью стального катода, восстановление Ni^{2+} из электролита происходит с той же скоростью [19]. Отсюда следует, что на поверхности стального катода в начале электролиза формируется плотный слой ДФ, покрытый никелем и обладающий повышенной микротвёрдостью.

На рисунке 5 приведены результаты определений содержания ДФ в композитном

электрохимическом покрытии никель–зола уноса. Можно отметить, что в КЭП никель–зола уноса при толщине 3,3–4,0 мкм содержание ДФ максимально и составляет 38 %. Затем наблюдается резкое падение содержания ДФ в покрытии, при толщине КЭП никель–зола уноса 10–16 мкм оно вновь возрастает до содержания 24–30 % и при 16,7–23 мкм остаётся постоянным – 32 % [20]. При изгибе пластины, покрытой КЭП никель–зола уноса, образование микротрещин не наблюдается

вследствие снижения внутренних напряжений. Шелушение и отслаивание также отсутствуют, увеличивая износостойкость изделий.

Заключение

Анализ литературных сведений показал, что снижение экологической опасности машиностроительных и авиастроительных производств может быть достигнуто при повторном использовании электролитов для получения композиционных покрытий с новыми физическими свойствами. К ним относятся композиты, состоящие из никелевой матрицы и дисперсной фазы, состоящей из микро- и наночастиц различных химических веществ, что улучшает внешний вид КЭП и повышает эксплуатационные характеристики.

Установлено, что активированная в отработанном растворе химического никелирования зола уноса характеризуется изменением окраски, что обусловлено восстановлением никеля равномерно по поверхности частиц.

Показано, что при внедрении в матрицу, полученную электрохимическим осаждением никеля и дисперсной фазы в виде золы уноса, покрытой слоем химически осаждённого никеля, образуется КЭП никель–зола уноса. Это приводит к снижению внутренних напряжений в покрытии, отсутствию шелушения и отслаивания, что увеличивает износостойкость изделий.

Присутствие в никелевой матрице частиц дисперсной фазы в виде активированной никелем золы уноса изменяет текстуру матрицы и механические характеристики без изменения внешнего вида.

На основании результатов по получению КЭП никель–зола уноса можно рекомендовать отработанный электролит никелирования с добавкой магнитной фракции золы уноса размером 125 мкм и ниже, покрытой слоем никеля, для нанесения твёрдых износостойких покрытий в паре механизма вал–ступица. Снижение содержания никеля в отработанных растворах химического никелирования позволяет упростить и сократить процессы очистки и утилизации, что ведёт к уменьшению затрат на реагенты, снижению расхода воды и энергии.

Разработанный состав электролита для нанесения КЭП никель–зола уноса, приготовленный с использованием отходов теплоэлектростанций, может применяться также для нанесения блестящего никелевого покрытия, так как не содержит, кроме золы уноса, никаких других примесей.

Таким образом, применение отработанного раствора химического никелирования для активации золы уноса представляет инновационный подход к утилизации промышленных отходов и созданию новых покрытий с улучшенными характеристиками.

Литература

1. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М.: Химия, 1983. 300 с.
2. Губин А.Ф., Гусев В.Ю., Чистякова Н.В. Экологические аспекты решения проблем утилизации электролитов химического никелирования // Пути и средства повышения экологической безопасности гальванических производств: тез. докл. науч.-техн. семинара. М.: РХТУ, 1994. С. 43.
3. Бушковский А.Л., Кармадонов Л.Н., Бордунов В.В. Способ очистки сточных вод от никеля // Патент RU 2010012 С1. Заявление: 5005020/26, 10.09.1991. Дата публикации: 30.03.1994.
4. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Отработанный раствор химического никелирования – ресурс для получения новых продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 131–136. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-131-136
5. Хазель М.Ю., Лют Петер, Зародин Г.С. Способ извлечения никеля из отработанных растворов гальванических производств // Патент RU 2125105 С1. Заявление: 96123204/02, 16.12.1996. Дата публикации: 20.01.1999.
6. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Регенерационная утилизация отработанных растворов химического никелирования // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 2. С. 262–270. doi: 10.15350/17270529.2023.2.24
7. Svyatokhina V.P., Isaeva O.Yu., Pestrikov S.V., Krasnogorskaya N.N. Estimation of efficiency of removal of heavy metal ions as hydroxides from sewage // Russ. J. Appl. Chem. 2003. V. 76. P. 320–322. doi: 10.1023/A:1024683519586
8. Чепрасова В.И., Залыгина О.С. Отработанные электролиты никелирования как вторичный сырьевой ресурс // Природные ресурсы. 2017. № 2. С. 126–133.
9. Андреева Н.Н., Любимова Я.С., Черник А.А., Кругликова Е.С. Интенсификация процесса утилизации отработанного раствора химического никелирования // Гальванотехника и обработка поверхности. 2017. Т. 25. № 2. С. 48–50. doi: 10.47188/0869-5326-2017-25-2-48
10. Кенжалиев Б.К., Беркинбаева А.Н., Досымбаева З.Д., Шарипов Р.Х., Сулейменов Э.Н. Изменение параметров водных растворов в процессе электрохимического выщелачивания вторичного сырья с применением серографитового электрода // Комплексное использование минерального сырья. 2016. № 1. С. 66–70.
11. Кунилова И.В., Крылов И.О. К вопросу комплексной переработки золы сжигания каменных углей предприятий теплоэлектроэнергетики // Технологии

переработки отходов с получением новой продукции: материалы V Всерос. науч.-практ. конф. Киров: Вятский государственный университет, 2023. С. 11–15.

12. Khoshnoud P., Abu-Zahra N. Kinetics of thermal decomposition of PVC/Fly ash composites // *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2017. V. 23. No. 2. P. 170–180. doi: 10.1080/1023666X.2017.1404668

13. Hue N.V., Phong N.N., Hanh P.H. Effects of sodium lauryl sulfate on co-electrodeposition of nickel and fly ash particles // *Int. J. Innov. Eng. Technol. (IJJET)*. 2017. V. 8. No. 3. P. 289–295. doi: 10.21172/ijiet.83.036

14. Ramesh C.S., Seshadri S.K., Iyer K.J.L. Wear resistance of nickel-fly ash composite coatings // *Wear*. 1991. V. 145. No. 1. P. 189–195. doi: 10.1016/0043-1648(91)90247-R

15. Li H., Dai M., Dai S., Dong X., Li F. Methylene blue adsorption properties of mechanochemistry modified coal fly ash // *Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J.* 2018. V. 24. No. 8. P. 2133–2141. doi: 10.1080/10807039.2018.1440527

16. Akinyemi S.A., Gitari W.M., Petrik L.F., Nyakuma B.B., Hower J.C., Ward C.R., Oliveira M.L.S., Silva L.F.O. Environmental evaluation and nano-mineralogical study of fresh and unsaturated weathered coal fly ashes // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 663. P. 177–188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.308

17. Silva L.F.O., DaBoit K., Serra C., Mardon S.M., Hower J.C. Fullerenes and metallofullerenes in coal-fired stocker fly ash // *Coal Combustion and Gasification Products*. 2010. V. 2. P. 66–79. doi: 10.4177/CCGP-D-10-00007.1

18. Лайнер В.И., Кудрявцев Н.Т. Основы гальваностегии. Ч. 1. М.: Металлургиздат, 1953. 624 с.

19. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – a critical review // *J. Alloys Compound*. 2013. V. 571. P. 183–204. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.107

20. Сайфуллин Р.С., Хацринов А.И., Водопьянова С.В., Мингазова Г.Г., Фомина Р.Е. Исследования в области создания композиционных электрохимических покрытий (КЭП) с дисперсной фазой микро- и наночастиц // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2009. № 6. С. 80–90.

References

1. Saifullin R.S. *Inorganic composite materials*. Moskva: Chemistry, 1983. 300 p. (in Russian).

2. Gubin A.F., Gusev V.Yu., Chistyakova N.V. Environmental aspects of solving the problems of recycling chemical nickel plating electrolytes // *Ways and means of improving the environmental safety of electroplating production: abstracts of the scientific and technical seminar*. Moskva: RKhTU, 1994. P. 43 (in Russian).

3. Bushkovskij A.L., Karmadonov L.N., Bordunov V.V. Method of sewage treatment from nickel // *Patent RU 2010012 C1*. Application: 5005020/26, 09.10.1991. Date of publication: 30.03.1994 (in Russian).

4. Shumilova M.A., Suksin N.E. The spent solution of chemical nickel plating is a resource for obtaining new products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 131–136 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-131-136

5. Khazel M.Ju., Ljut Peter, Zarodin G.S. Method of nickel recovery from sheet solutions of electroplating // *Patent RU 2125105 C1*. Application: 96123204/02, 12.16.1996. Date of publication: 20.01.1999 (in Russian).

6. Shumilova M.A., Suksin N.E. Regeneration disposal waste solutions of chemical nickel plating // *Chemical physics and mesoscopy*. 2023. V. 25. No. 2. P. 262–270 (in Russian). doi: 10.15350/17270529.2023.2.24

7. Svyatokhina V.P., Isaeva O.Yu., Pestrikov S.V., Krasnogorskaya N.N. Estimation of efficiency of removal of heavy metal ions as hydroxides from sewage // *Russ. J. Appl. Chem.* 2003. V. 76. P. 320–322. doi: 10.1023/A:1024683519586

8. Cheprasova V.I., Zalygina O.S. Spent nickel plating electrolytes as a secondary raw material resource // *Natural Resources*. 2017. No. 2. P. 126–133 (in Russian).

9. Andreeva N.N., Lyubimova Ya.S., Chernik A.A., Kruglikova E.S. Intensification of the process of utilization of spent chemical nickel plating solution // *Electroplating and surface treatment*. 2017. V. 25. No. 2. P. 48–50 (in Russian). doi: 10.47188/0869-5326-2017-25-2-48

10. Kenzhaliyev B.K., Berkinbayeva A.N., Dosymbayeva Z.D., Sharipov R.Kh., Suleimenov E.N. The change in the parameters of the aqueous solutions during the electrochemical leaching of the secondary raw materials by using sulfur-graphite electrode // *Complex use of mineral resources*. 2016. No. 1. P. 66–70 (in Russian).

11. Kunilova I.V., Krylov I.O. On the issue of integrated processing of coal ash from thermal power plants // *Waste processing technologies to produce new products: materialy V Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Киров: Vyatka State University, 2023. P. 11–15 (in Russian).

12. Khoshnoud P., Abu-Zahra N. Kinetics of thermal decomposition of PVC/Fly ash composites // *Int. J. Polym. Anal. Charact.* 2017. V. 23. No. 2. P. 170–180. doi: 10.1080/1023666X.2017.1404668

13. Hue N.V., Phong N.N., Hanh P.H. Effects of sodium lauryl sulfate on co-electrodeposition of nickel and fly ash particles // *Int. J. Innov. Eng. Technol. (IJJET)*. 2017. V. 8. No. 3. P. 289–295. doi: 10.21172/ijiet.83.036

14. Ramesh C.S., Seshadri S.K., Iyer K.J.L. Wear resistance of nickel-fly ash composite coatings // *Wear*. 1991. V. 145. No. 1. P. 189–195. doi: 10.1016/0043-1648(91)90247-R

15. Li H., Dai M., Dai S., Dong X., Li F. Methylene blue adsorption properties of mechanochemistry modified coal fly ash // *Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J.* 2018. V. 24. No. 8. P. 2133–2141. doi: 10.1080/10807039.2018.1440527

16. Akinyemi S.A., Gitari W.M., Petrik L.F., Nyakuma B.B., Hower J.C., Ward C.R., Oliveira M.L.S., Silva L.F.O. Environmental evaluation and nano-mineral-

ogical study of fresh and unsaturated weathered coal fly ashes // Sci. Total Environ. 2019. V. 663. P. 177–188. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.308

17. Silva L.F.O., DaBoit K., Serra C., Mardon S.M., Hower J.C. Fullerenes and metallofullerenes in coal-fired stocker fly ash // Coal Combustion and Gasification Products. 2010. V. 2. P. 66–79. doi: 10.4177/CCGP-D-10-00007.1

18. Layner V.I., Kudryavtsev N.T. Fundamentals of galvanostegia. V. 1. Moskva: Metallurgizdat, 1953. 624 p. (in Russian).

19. Sudagar J., Lian J., Sha W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings – a critical review // J. Alloys Compound. 2013. V. 571. P. 183–204. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.03.107

20. Sayfullin R.S., Khatsrinov A.I., Vodopyanova S.V., Mingazova G.G., Fomina R.E. Research in the field of creation of composite electrochemical coatings (CEC) with a dispersed phase of micro- and nanoparticles // Herald of Kazan Technological University. 2020. No. 6. P. 80–90 (in Russian).

**Приглашаем принять участие в работе
III Международной научно-практической конференции
«Экология родного края: проблемы и пути их решения»
г. Киров, 22–23 апреля 2026 г.**

Основные научные направления работы конференции:

1. Экологические проблемы регионов, пути решения.
2. Экологический мониторинг состояния окружающей среды.
3. Химия и экология почв.
4. Химия и экология микроорганизмов.
5. Биология и экология растений.
6. Химия природного сырья и контроль качества фармсубстанций.
7. Биология и экология животных.
8. Социальная экология и здоровье.
9. Отходы производства и потребления: экологические аспекты.
10. Экологическое образование и воспитание.

Организаторы конференции: Вятский государственный университет, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Ляонинский институт науки и технологии.

Контакты: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>

e-mail: confbioeco@gmail.com

Тел. 8(8332)37-02-77

Механизм согласованной экологизации эксплуатируемых тепловозов

© 2026. В. В. Цыганов¹, д. т. н., г. н. с.,
А. К. Еналеев¹, к. т. н., с. н. с.,

С. А. Савушкин², к. ф.-м. н., в. н. с.,

¹ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова
Российской академии наук (ИПУ РАН),
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65,

²ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко
Российской академии наук (ИПТ РАН),
199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 12-я линия Васильевского острова, д. 13,
e-mail: bbc@ipu.ru

Экологически безопасное развитие железнодорожного транспорта призвано обеспечить требования к экологичности тепловозов. Эти требования отражены в национальных и региональных стандартах допустимых выбросов основных вредных веществ – оксидов азота и углерода, углеводородов и твёрдых частиц. Однако эти стандарты остаются неизменными в течение десятилетий, несмотря на появление новых, более экологичных технологий. Тем не менее, до настоящего времени ни в России, ни в мире не разработаны механизмы, которые бы стимулировали применение таких технологий для повышения экологичности уже эксплуатируемых тепловозов, заведомо удовлетворяющих указанным неизменным стандартам. В работе предложен механизм стимулирования разработки и внедрения инноваций в области охраны окружающей среды на таких тепловозах в тот период, когда экологические стандарты остаются неизменными. Этот механизм включает процедуру формирования нормативов отнесения показателей выбросов вышеуказанных основных вредных веществ к одному из четырёх классов (неудовлетворительно, удовлетворительно, хорошо, отлично). При этом используются как отечественные стандарты, так и национальные и региональные требования к уровням выбросов основных вредных веществ за рубежом. Класс каждого показателя определяется путём сопоставления его фактического значения с соответствующим нормативом. Далее, путём объединения указанных классов, определяется класс экологичности тепловоза, в зависимости от которого стимулируются заинтересованные лица – исследователи и разработчики инноваций, производственный персонал, экологи и менеджеры. Тем самым, интересы последних согласуются с интересами экологизации железнодорожного транспорта. Такой согласованный механизм призван поощрять исследования, разработки и внедрение инноваций в процессе эксплуатации тепловозов для повышения их экологичности. Рассмотрены примеры определения классов экологичности отечественных и зарубежных тепловозов. Результаты работы были использованы при разработке концепции требований к тепловозам ОАО «РЖД» в области охраны окружающей среды.

Ключевые слова: окружающая среда, вредные факторы, железные дороги, выброс загрязняющих веществ, оценка выбросов, контроль выбросов, парниковые газы, углеводороды, стимулирующие механизмы.

Mechanisms for coordinated ecologization of operational diesel locomotives

© 2026. V. V. Tsyganov¹ ORCID: 0000-0001-9274-0548[†]

A. K. Enaleev¹ ORCID: 0000-0002-4450-9533[†]

S. A. Savushkin² ORCID: 0000-0002-8833-1896[†]

¹V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences,
65, Profsoyuznaya St., Moscow, Russia, 117997,

²N.S. Solomenko Institute of Transport Problems of Russian Academy of Sciences,
13, line 12, Vasilyevsky Island, St. Petersburg, Russia, 199178,
e-mail: bbc@ipu.ru

Environmentally friendly development of railway transport is mainly due to the greening of diesel locomotives. Requirements for their environmental friendliness are traditionally reflected in national and regional standards for permissible emissions of the main harmful substances – nitrogen and carbon oxides, hydrocarbons and solid particles. However, in practice, these standards remain unchanged for decades. During this time, new, more environmentally

friendly technologies appear. However, outdated standards sometimes do not stimulate their implementation. For example, to date, neither in Russia nor in the world have mechanisms been developed that would stimulate the use of such technologies to improve the environmental friendliness of already operated locomotives that have long met the specified unchangeable standards. The paper proposes a mechanism for the greening of such locomotives. It includes a procedure for forming standards for classifying the emission indicators of the harmful substances by locomotives into one of four classes. The specified standards depend on the mileage and duration of locomotive operation, as well as on the stage of locomotive construction at which it was created. When forming these standards, both domestic standards and national and regional standards of countries with advanced locomotive construction are used. Then, by combining the specified classes, the environmental class of the locomotive is determined. Depending on the latter, interested parties are stimulated – researchers and developers of innovations, production personnel, ecologists and managers. Thus, the interests of these parties are consistent with the interests of greening railway transport and environmental protection. Examples of determining the environmental classes of domestic and foreign locomotives created at different stages of the development of locomotive construction, depending on the duration of their operation are considered. The obtained results are implemented in the development of the concept of requirements for locomotives of JSC “Russian Railways” in the field of environmental protection.

Keywords: environment, harmful factors, railways, emissions, emission assessment, emission control, greenhouse gases, hydrocarbons, incentive mechanisms.

Экологическая эффективность является основой устойчивого развития экономики и общества [1]. Соответственно, одной из ключевых проблем устойчивого развития является загрязнение атмосферного воздуха, влияющее на здоровье населения и климат. В частности, доказано, что длительное воздействие взвешенных в воздухе частиц, а также оксидов азота и углерода негативно влияет на здоровье человека [2]. В статье [3] проведён анализ выбросов предприятиями загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферный воздух. Рекомендовано учитывать при экологическом мониторинге выбросы таких веществ, как оксиды азота и углерода, а также взвешенных частиц.

Наибольший вклад в парниковый эффект, влияющий на климат, вносят водяной пар H_2O , углекислый газ CO_2 , метан CH_4 и оксид азота N_2O [4]. Во многих крупных российских компаниях разработаны и внедрены системы углеродного менеджмента, направленные на уменьшение выбросов углекислого газа [5].

Более общие проблемы управления экологизированными производствами (ЭП) на корпоративном, региональном и государственном уровнях рассмотрены в статье [6]. В статье [7] рассмотрены подсистемы такого рода контроля выбросов в атмосферу загрязняющих веществ: оксидов серы, углерода, азота, углеводородов, твёрдых частиц и др.

В ряду проблем ЭП выделяется разработка экологически чистых транспортных систем [8]. На транспорт приходится 20–25% мирового потребления энергии и выбросов углекислого газа [9]. Почти 97% вредных выбросов от транспорта в атмосферу приходится на отработанные газы (ОГ), образующиеся при сжигании топлива [10].

Экологически безопасное развитие железнодорожного транспорта в значительной степени зависит от экологизации тепловозов, на которые приходится до 80% выбросов в воздух основных вредных веществ (ВВ) в ОГ. К этим ВВ относятся твёрдые частицы и оксиды азота [11], а также парниковые газы (оксиды углерода и углеводороды) [12]. В связи с этим, на железнодорожном транспорте последовательно ведётся работа по снижению выбросов ВВ в ОГ на всех стадиях жизненного цикла локомотивов «Разработка – производство – эксплуатация – модернизация – капитальный ремонт – эксплуатация – утилизация».

Например, проблеме снижения выбросов ВВ на стадии «разработка» жизненного цикла дизель-электровозов посвящена статья [13]. В ней предложен механизм проектирования экологичных дизель-электровозов с пониженными выбросами указанных ВВ для ЭП.

Проблеме снижения выбросов ВВ на стадии «модернизация» жизненного цикла тепловозов посвящена статья [14]. В ней предложен прогрессивный механизм экологичной модернизации эксплуатируемых тепловозов, в результате которой снижаются выбросы ВВ в ОГ.

Как показано в статье [15], особое значение для устойчивого развития железнодорожного транспорта приобретает капитальный ремонт тепловозов. Предложены механизмы его проведения на стадии «капитальный ремонт» жизненного цикла тепловозов, улучшающие экологические характеристики отремонтированных тепловозов в соответствии с лучшими практиками [15].

К сожалению, средств на экологичную модернизацию и капитальный ремонт всего парка эксплуатируемых тепловозов не хватает. Положение усугубляется тем, что стандарты,

определяющие предельные нормы выбросов ВВ тепловозами, не меняются десятилетиями. За это время создаются новые технологии, позволяющие обеспечить более высокий уровень экологичности. Однако механизмы оценки экологичности эксплуатируемых тепловозов, которые бы учитывали возросший, с начала их эксплуатации, уровень экологических требований, до сих пор не были разработаны. Однако, не имея оценок экологичности эксплуатируемых тепловозов, трудно определить, какие из них следует модернизировать и ремонтировать в первую очередь, и принимать соответствующие обоснованные решения.

Цель данной работы – создание организационного механизма, который бы позволял оценивать экологичность эксплуатируемых тепловозов с учётом растущего уровня экологических требований, для того, чтобы затем принимать обоснованные решения об их модернизации и ремонте, стимулирующие сокращение выбросов ими ВВ в ОГ.

Объекты и методы исследования

Требования к экологичности эксплуатируемых тепловозов. В России максимально допустимые значения выбросов ВВ в ОГ эксплуатируемых тепловозов зависят от двух факторов: периода постройки и постановки на производство его двигателя (стадии тепловоза); пробега и продолжительности эксплуатации (степени эксплуатации). Эти максимально допустимые значения сведены в таблицу 1. Исходные данные для её построения содержатся в таблице 5.1 и п. 5.3 ГОСТ 33754-2016 (где указаны предельно допустимые значения удельных средневзвешенных выбросов ВВ в ОГ), а также в п. 5.8 ГОСТ 33754-2016 (где указаны возможные увеличения этих значений, в зависимости от пробега и сроков эксплуатации).

Для того, чтобы оценивать экологичность эксплуатируемых тепловозов с учётом существующего мирового и регионального уровня экологических требований, необходимо привести к сопоставимому виду соответствующие национальные и региональные требования относительно выбросов ВВ локомотивами в развитых странах [16–18].

В США тепловоз сертифицируется в соответствии с правилами ЕРА [16, 17]. Значения удельных средневзвешенных выбросов основных ВВ (измеряемые в США в г/л.с.-ч) сопоставляются с нормами одного из уровней стандартов (Tier of standards). В свою очередь,

этот уровень зависит от времени постройки тепловоза – аналогично тому, как требования ГОСТ 33754-2016 зависят от стадии c (см. табл. 1). Поэтому для тепловозов стадии c используется стандарт Tier c , где $c=0, \dots, 4$. Для того чтобы соизмерить требования Tier c с нормами ГОСТ 33754-2016, авторами построена таблица 2, структура которой аналогична структуре таблицы 1. При этом в таблице 2 нормы стандартов ЕРА пересчитаны в единицы г/кВт-ч.

Исходными данными для построения таблицы 2 являются таблица III.-1 и III.-2 правил ЕРА [16], в которых указаны нормы Tier 1–4 по выбросам оксидов азота, углеводородов и твёрдых частиц, а также таблица 1–28 и таблицы «Нормы выбросов при перевозках по магистрали» и «Нормы выбросов маневровых тепловозов» [17], в которых указаны нормы выбросов оксида углерода.

В правилах ЕРА [16] (таблица III.-1) указаны нормы Tier 0 по выбросам ВВ для магистральных тепловозов с отдельным контуром охлаждения всасываемого воздуха и без него. В ГОСТ 33754-2016 такая детализация не предусмотрена. Поэтому, для соизмерения с ГОСТ, в таблице 2 указано среднее значение допустимых выбросов ВВ, соответствующее уровню Tier 0 для тепловозов с контуром охлаждения всасываемого воздуха и без него.

Далее, в таблицах III.-1 и III.-2 правил ЕРА [16] указаны нормы Tier 1–4 по выбросам оксидов азота, углеводородов и твёрдых частиц для магистральных и маневровых тепловозов, соответственно. Для соизмерения правил ЕРА [16] с ГОСТ 33754-2016, в таблице 2 указаны средние значения упомянутых норм для магистральных и маневровых тепловозов.

Аналогичным образом усредняются нормы выбросов оксида углерода, которые в правилах ЕРА [17] указаны для магистральных и маневровых тепловозов. По стандартам Tier 0 – Tier 2 они указаны в таблице 1–28 [17] отдельно для магистральных и маневровых тепловозов. По стандартам Tier 3 и Tier 4 – в таблицах «Нормы выбросов при перевозках по магистрали» и «Нормы выбросов маневровых тепловозов» [17] для магистральных и маневровых тепловозов, соответственно. Для соизмерения норм ЕРА с нормами ГОСТ 33754-2016 в таблице 2 указаны усреднённые значения для магистральных и маневровых тепловозов.

В Европейском Союзе (ЕС) нормы регулирования выбросов ВВ от дизельных двигателей транспортных средств были впервые

Таблица 1 / Table 1

Допустимые удельные средневзвешенные выбросы вредных веществ в отработавших газах эксплуатируемых тепловозов / Permissible specific average weighted emissions of harmful substances in exhaust gases of operated diesel locomotives

Стадия Stage c^*	Эксплуатируемые тепловозы Diesel locomotives in operation	Степень эксплуатации Degree of operation, e^{**}	Допустимые средневзвешенные выбросы, г/кВт·ч Permissible average weighted emissions, g/kWh			
			оксида углерода(II) carbon monoxide b_{1ce}	углеводородов hydrocarbons b_{2ce}	оксидов азота nitrogen oxides b_{3ce}	твёрдых частиц particulate matter b_{4ce}
0, $c=0$	С двигателями, поставленными на производство до 2000 г. With engines put into production before 2000	0	10	-	25	-
		1	11,5			
		2	12,5			
		3	13			
		4	13,5			
		5	14,175			
1, $c=1$	Постройки до 2016 г. с двигателями, поставленными на производство до 2000 г. Built before 2016 with engines put into production before 2000	0	6	2,4	18	-
		1	6,9	2,76		
		2	7,5	3		
		3	7,8	3,12		
		4	8,1	3,24		
		5	8,505	3,402		
2, $c=2$	С двигателями, поставленными на производство с 2000 до 2020 г. With engines put into production from 2000 to 2020	0	3,5	1	12	-
		1	4,025	1,15		
		2	4,375	1,25		
		3	4,55	1,3		
		4	4,725	1,35		
		5	4,9	1,4		
3А, $c=3$	С двигателями, поставленными на производство с 2020 до 2025 г. With engines put into production from 2020 to 2025	0	3,5	0,4	7,4	-
		1	4,025	0,46		
		2	4,375	0,5		
		3	4,55	0,52		
		4	4,725	0,54		
		5	4,9	0,56		
3Б, $c=4$	С двигателями, поставленными на производство с 2025 г. With engines put into production from 2025	0	1,5	0,4	4,0	0,15
		1	1,725	0,46		0,1725
		2	1,875	0,5		0,1875
		3	1,95	0,52		0,195
		4	2,025	0,54		0,2025
		5	2,1	0,56		0,21

Примечание к таблицам 1–4: * – номер стадии «с» определяется периодом постройки модернизированного тепловоза с определёнными двигателями, $c=0, \dots, 4$. ** – индекс степени эксплуатации e ($e=1, \dots, 5$) определяется так: пробег до 150 тыс. км или эксплуатация до 18 месяцев (включая приёмочные и сертификационные испытания) – $e=0$; пробег от 150 до 300 тыс. км или эксплуатация от 18 до 36 месяцев – $e=1$; пробег 300–500 тыс. км или эксплуатация 36–60 месяцев – $e=2$; пробег свыше 500 тыс. км или эксплуатация свыше 60 месяцев – $e=3$; эксплуатация свыше 90 месяцев – $e=4$; свыше 20 лет – $e=5$. Прочерк означает, что показатель не нормируется ГОСТ 33754-2016.

Note to tables 1–4: * – stage number “c” is determined by the period of construction of the modernized diesel locomotive with certain engines, $c=0, \dots, 4$. ** – the index of the degree of operation “e” ($e=1, \dots, 5$) is determined as follows: mileage up to 150 thousand km or operation up to 18 months (including acceptance and certification tests) – $e=0$; mileage from 150 to 300 thousand km or operation from 18 to 36 months – $e=1$; mileage from 300 to 500 thousand km or operation from 36 to 60 months – $e=2$; mileage over 500 thousand km or operation over 60 months – $e=3$; operation over 90 months – $e=4$; over 20 years – $e=5$. A dash means that the indicator is not standardized by GOST 33754-2016.

Таблица 2 / Table 2

Допустимые удельные средневзвешенные выбросы вредных веществ в отработавших газах тепловозов по правилам ЕРА [16, 17] / Permissible specific average weighted emissions of harmful substances in exhaust gases of operated diesel locomotives according to EPA rules [16, 17]

Стадия Stage, <i>c</i>	Уровень ЕРА Tier	Допустимые средневзвешенные выбросы, г/кВт-ч Permissible average weighted emissions, g/kWh			
		оксида углерода carbon monoxide t_{1c}	углеводородов hydrocarbons t_{2c}	оксидов азота nitrogen oxides t_{3c}	твёрдых частиц particulate matter t_{4c}
0	Tier 0	8,72	1,93	13,07	0,32
1	Tier 1	3,15	1,17	12,34	0,32
2	Tier 2	2,61	0,60	9,12	0,15
3	Tier 3	2,09	0,60	7,04	0,13
4	Tier 4	2,09	0,19	1,74	0,04

Таблица 3 / Table 3

Допустимые удельные средневзвешенные выбросы вредных веществ в отработавших газах тепловозов с дизельными двигателями согласно стандартам ЕС / Permissible specific average weighted emissions of harmful substances in exhaust gases of operated diesel locomotives according to EU standards

Стадия Stage, <i>c</i>	Стадия ЕС EU Stage	Допустимые средневзвешенные выбросы, г/кВт-ч Permissible average weighted emissions, g/kWh			
		оксида углерода carbon monoxide s_{1c}	углеводородов hydrocarbons s_{2c}	оксидов азота nitrogen oxides s_{3c}	твёрдых частиц particulate matter s_{4c}
0	I	5,0	1,3	9,2	0,54
1	II	3,5	1,0	6,0	0,20
2	IIIА	3,5	0,38	5,7	0,20
3	IIIВ	3,5	0,25	3,75	0,025
4	V	3,5	0,25	3,75	0,025

указаны в стандартах Stage I в 1999–2000 гг. Эти нормы касались двигателей, поставленных на производство до 2000 г. (что соответствует начальной стадии постройки тепловозов: $c=0$). В 2001–2004 гг. были введены более жёсткие стандарты Stage II (соответствующие следующей – первой стадии постройки тепловозов: $c=1$). В дальнейшем, в ЕС были введены стандарты выбросов тепловозов Stage IIIА, Stage IIIВ и Stage V. Также, как в ГОСТ 33754-2016 и в правилах ЕРА, нормы выбросов ВВ в ЕС определяются в зависимости от периода постройки тепловоза (т. е. стадии c).

Допустимые удельные средневзвешенные выбросы ВВ в ОГ дизельных двигателей транспортных средств, регламентируемые стандартами ЕС Stage I и Stage II, определены в таблице 1 [18] и приведены в двух верхних строках таблицы 3. Нормы Stage IIIА, Stage IIIВ (таблица 8 из [18]) и Stage V (таблица 9 из [18]) сведены в таблице 3. Разная степень детализации требований ГОСТ 33754-2016 и стандартов ЕС определяет особенности формирования таблицы 3.

Например, в стандарте Stage IIIА эти нормы указаны для тепловозов второй стадии ($c=2$). При этом в таблице 8 из [18] заданы

нормы выбросов тепловозов с двигателями категории RL А мощностью 130–560 кВт (маневровых тепловозов), а также категории RH А мощностью 561–2000 кВт и более 2000 кВт (в основном, магистральных тепловозов). Для соизмерения норм стандарта Stage IIIА с нормами ГОСТ 33754-2016 и ЕРА, в таблице 3 указаны средние значения норм для тепловозов с двигателями мощностью 130–560, 561–2000 и более 2000 кВт.

Далее, согласно таблицам 8 и 9 из [18], стандарты Stage IIIВ и Stage V ограничивают лишь суммы выбросов оксидов азота и углеводородов. Поэтому, для соизмерения с ГОСТ 33754-2016 и стандартами ЕРА, в таблице 3 указаны расчётные нормы выбросов по стандартам Stage IIIВ и Stage V, полученные путём деления указанной суммы пропорционально нормам выбросов оксидов азота и углеводородов тепловозов с двигателями категории RH А, указанным в стандарте Stage IIIА.

Результаты и обсуждение

Алгоритм классификации показателя удельных средневзвешенных выбросов тепловоза y_i , $i=1, \dots, 4$, делит множество всех

возможных значений показателя y_i на следующие классы с оценками неудовлетворительно ($q_i=0$), удовлетворительно ($q_i=1$), хорошо ($q_i=2$) и отлично ($q_i=3$). На основе норм национальных и региональных стандартов (табл. 1–3) рассчитываются нормативы m_{ice}^q , разделяющие значения показателя y_i (выбросов i -го ВВ тепловозом стадии c и степени эксплуатации e) на вышеуказанные классы:

– норматив m_{ice}^1 , используемый для разделения классов 0 и 1 показателя y_i , рассчитывается как наибольшее значение из вышеуказанных национальных и региональных норм:

$$m_{ice}^1 = \max(b_{ice}, t_{ic}, s_{ic}), i=1, \dots, 4, c=0, \dots, 4, e=1, \dots, 5; \quad (1)$$

– норматив m_{ice}^2 , используемый для разделения классов 1 и 2 показателя y_i , равен среднему арифметическому вышеуказанных норм:

$$m_{ice}^2 = (b_{ice} + t_{ic} + s_{ic})/3, i=1, \dots, 4, c=0, \dots, 4, e=1, \dots, 5, \quad (2)$$

причём эта формула не применяется для случаев, когда ГОСТ 33754-2016 не устанавливает верхние границы выбросов; именно, поскольку в этих случаях $b_{20e} = b_{4ce} = \infty, c=0, \dots, 3, e=1, \dots, 5$ (см. табл. 1), то норматив m_{ice}^2 принимается равным наибольшему значению норм национального и регионального экологических стандартов, указанных в таблицах 2 и 3:

Таблица 4 / Table 4
Нормативы классификации удельных средневзвешенных выбросов ВВ в ОГ тепловозов
Standards for classification of specific average weighted emissions of harmful substances
in exhaust gases of operated diesel locomotives

Стадия Stage, c	e	Нормативы классификации удельных средневзвешенных выбросов (г/кВт-ч) Standards for classification of specific average weighted emissions (g/kWh)			
		оксида углерода carbon monoxide m_{1ce}	углеводородов hydrocarbons m_{2ce}	оксидов азота nitrogen oxides m_{3ce}	твёрдых частиц particulate matter m_{4ce}
0, $c=0$	0	10,0; 7,9; 5,0	–; 1,93; 1,3	25,0; 15,76; 9,2	–; 0,54; 0,32
	1	11,5; 8,4; 5,0			
	2	12,5; 8,74; 5,0			
	3	13,0; 8,9; 5,0			
	4	13,5; 9,07; 5,0			
1, $c=1$	0	6,0; 4,22; 3,15	2,4; 1,52; 1,0	18,0; 12,11; 6,0	–; 0,32; 0,20
	1	6,9; 4,52; 3,15	2,76; 1,64; 1,0		
	2	7,5; 4,72; 3,15	3,0; 1,72; 1,0		
	3	7,8; 4,82; 3,15	3,12; 1,76; 1,0		
	4	8,1; 4,92; 3,15	3,24; 1,8; 1,0		
2, $c=2$	0	3,5; 3,2; 2,61	1,0; 0,66; 0,38	12,0; 8,94; 5,7	–; 0,20; 0,15
	1	4,03; 3,38; 2,61	1,15; 0,71; 0,38		
	2	4,38; 3,5; 2,61	1,25; 0,74; 0,38		
	3	4,55; 3,55; 2,61	1,3; 0,76; 0,38		
	4	4,73; 3,61; 2,61	1,35; 0,78; 0,38		
3А, $c=3$	0	3,5; 3,03; 2,09	0,6; 0,42; 0,25	7,4; 6,06; 3,75	–; 0,13; 0,025
	1	4,03; 3,21; 2,09	0,6; 0,44; 0,25		
	2	4,38; 3,32; 2,09	0,6; 0,45; 0,25		
	3	4,55; 3,38; 2,09	0,6; 0,457; 0,25		
	4	4,73; 3,44; 2,09	0,6; 0,463; 0,25		
3Б, $c=4$	0	3,5; 2,36; 1,50	0,4; 0,28; 0,19	4,00; 3,16; 1,74	0,15; 0,072; 0,025
	1	3,5; 2,44; 1,73	0,46; 0,3; 0,19		0,173; 0,079; 0,025
	2	3,50; 2,49; 1,88	0,5; 0,31; 0,19		0,188; 0,084; 0,025
	3	3,5; 2,51; 1,95	0,52; 0,32; 0,19		0,195; 0,087; 0,025
	4	3,5; 2,54; 2,03	0,54; 0,33; 0,19		0,203; 0,089; 0,025

Примечание: нормативы m_{ice}^q , рассчитанные по формулам (1)–(4) и используемые для классификации показателя y_i , разделены точкой с запятой.

Note: m_{ice}^q , standards calculated using formulas (1)–(4) and used to classify the y_i indicator are separated by semicolons.

$$m_{20e}^2 = \max(t_{20}, s_{20}), m_{4ce}^2 = \max(t_{4c}, s_{4c}),$$

$$c=0, \dots, 4, e=1, \dots, 5; \quad (3)$$

– норматив m_{ice}^3 , используемый для разделения классов 2 и 3 показателя y_i , равен наименьшему значению из вышеуказанных норм:

$$m_{ice}^3 = \min(b_{ice}, t_{ic}, s_{ic}), i=1, \dots, 4, c=0, \dots, 4,$$

$$e=1, \dots, 5. \quad (4)$$

Норматив класса 1 (удовлетворительные значения) соответствует принятому в РФ уровню показателя выбросов, норматив класса 2 (хорошие значения) – лучшему из локальных (национальных или региональных) уровней, а норматив класса 3 (отличные значения) – мировому уровню соответствующего показателя.

Рассчитанные по формулам (1) – (4) нормативы m_{ice}^q , используемые далее для классификации показателя y_i , приведены в соответствующей ячейке таблицы 4. Например, норматив класса 3 ($q_1=3$) для показателя углеводородов ($i=2$) тепловозом стадии 2 ($c=2$) и степени эксплуатации 1 ($e=2$) равен $m_{101}^2=0,38$ г/кВт-ч.

С использованием нормативов, приведённых в таблице 4, показателю $y_i, i=1, \dots, 4$, ВВ тепловоза стадии c и степени эксплуатации e присваивается класс:

$$q_i = l \text{ при } m_{ice}^{l+1} < y_i \leq m_{ice}^l, \text{ где } l=0, \dots, 3,$$

$$m_{ice}^0 = \infty, m_{ice}^4 = 0. \quad (5)$$

Например, показателю $y_1=6,4$ г/кВт-ч выбросов оксида углерода ($i=1$) тепловозом стадии 0 ($c=0$) и степени эксплуатации 1 ($e=1$) присваивается класс 2 ($q_i=l=2$), поскольку при $l=2$ имеем: $m_{101}^3=5 < 6,4 \leq 8,4=m_{101}^2$.

Алгоритм объединения (свёртки) классов показателей ВВ, определяемых по формуле (5), позволяет определить класс экологичности эксплуатируемого тепловоза. Этот алгоритм иллюстрирует рисунок 1. Символами Q^C, Q^G, Q^E обозначены матрицы попарных свёрток классов $q_i, i=1, \dots, 4$, и классов q^C, q^G , получаемых из этих матриц (см. табл. 5).

Матрицы Q^C, Q^G, Q^E , показанные в таблице 5, сформированы на основе экспертных оценок. Свёртка q^C для классов q_1 и q_2 – это элемент матрицы Q^C в строке q_1+1 и столбце q_2+1 . Аналогично производится свёртка классов q_3 и q_4 с выходами матриц Q^G и Q^E , соответственно. Выход матрицы Q^C определяет класс q^C парниковых газов в ОГ. Выход матрицы Q^E определяет класс экологичности эксплуатируемого тепловоза q^E в отношении выбросов ВВ в ОГ.

Механизм согласованного снижения выбросов при эксплуатации тепловозов.

Описанные выше алгоритмы нормирования, классификации и свёртки показателей выбросов ВВ в ОГ позволяют определить класс экологичности эксплуатируемого тепловоза. На его основе можно реализовать процедуру стимулирования заинтересованных лиц (руководителей, инженеров, производственников, экологов), направленную на согласование их интересов в направлении снижения выбросов ВВ в ОГ эксплуатируемых тепловозов.

Объединяя упомянутые алгоритмы в процедуры, получаем механизм согласованного снижения выбросов ВВ эксплуатируемых тепловозов, формально обозначаемый $D=\{M, Q, V\}$. В этом механизме процедура нормирования M описывается формулами (1) – (4) и таблицей 4. Процедура классификации Q описывается формулой (5), алгоритмом свёртки классов (рис. 1) и матрицами (табл. 5).

Процедура стимулирования V обеспечивает поощрение заинтересованных лиц при снижении выбросов ВВ в ОГ эксплуатируемых тепловозов. В случае присвоения тепловозу j -го класса экологичности, поощрение равно $V_{ce}(j), j=0, \dots, 3$. При этом, чем выше класс, тем больше поощрение: $V_{ce}(0) < V_{ce}(1) < V_{ce}(2) < V_{ce}(3)$. Методология формирования процедуры стимулирования изложена в [19]. Теория и методология построения механизмов управления большими транспортными системами с процедурами стимулирования разработана в [20].

Например, показатели эксплуатируемого тепловоза ТГМ-6А стадии 0 ($c=0$): $y_3=25$ г/кВт-ч, $y_1=10$ [21]. Используя алгоритм (5)

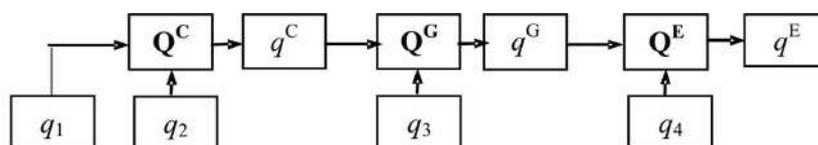


Рис. 1. Алгоритм свёртки классов показателей ВВ (по формуле 5) для определения класса экологичности эксплуатируемого тепловоза
Fig. 1. Algorithm for convolution of classes of emissions indicators (by formula 5) to determine the environmental class of the diesel locomotive

Таблица 5 / Table 5

Матрицы попарной свёртки Q^C, Q^G, Q^E / Pairwise convolution matrices Q^C, Q^G, Q^E

Матрица / Matrice														
Q^C					Q^G					Q^E				
Класс q_1 Class q_1	Класс q_2 / Class q_2				Класс q_3 Class q_3	Класс q^C Class q^C				Класс q^G Class q^G	Класс q_4 Class q_4			
	0	1	2	3		0	1	2	3		0	1	2	3
0	0	0	1	1	0	0	0	1	2	0	0	0	0	
1	0	1	1	2	1	0	0	1	3	1	0	1	1	
2	1	1	2	3	2	1	1	2	3	2	0	1	1	
3	1	2	3	3	3	1	2	3	3	3	0	1	2	

и нормативы таблицы 4 при $c=0$, для любой степени эксплуатации e имеем $q_1=1, q_3=1$. Выбросы вредных веществ ТГМ-6А также соответствуют классу 1: $q_2=1, q_4=1$, так как y_2 и y_4 для ТГМ-6А не нормируются.

Сворачивая классы q_1 и q_2 согласно алгоритму (рис. 1), на выходе матрицы Q^C (табл. 5) получаем $q^C=1$. Свёртка q^C с q_3 по матрице Q^G (табл. 5) даёт класс $q^G=0$. Свёртка q^G с q_4 по матрице Q^E даёт $q^E=0$. Получаем, что ТГМ-6А имеет класс экологичности 0. Следовательно, эксплуатируемый тепловоз ТГМ-6А подлежит модернизации или капитальному ремонту в первую очередь.

Для сравнения, рассмотрим эксплуатируемый тепловоз ТЭМП1тт, созданный на базе ТГМ-6А [22]. Данный тепловоз оборудован дизелями Volvo Penta TAD1641 VE-B, производимыми с 2000-го года [21], поэтому ТЭМП1тт относится к стадии 2. Соответственно, для оценки его экологичности используются нормативы таблицы 4 при $c=2$.

По результатам эксплуатации ТЭМП1тт установлено, что $e=0, y_1=3,5, y_2=1,0, y_3=6,0, y_4=0,2$ г/кВт-ч [21]. Используя нормативы таблицы 4 при $c=2, e=0$, из (5) имеем $q_1=1, q_2=1, q_3=2, q_4=2$. Сворачивая эти классы согласно процедуре классификации Q , получаем $q^C=1, q^G=1, q^E=1$. Таким образом, ТЭМП1тт имеет первый класс экологичности. Соответственно, его разработчики заслужили поощрение $V_{20}(1)$.

В качестве третьего примера рассмотрим тепловозы серии Genset. Компания Union Pacific эксплуатирует маневровые тепловозы серии Genset с шестью небольшими дизельными двигателями с сажевыми фильтрами (DPF) [23]. При необходимости Genset использует мощность всех двигателей, но для многих работ требуется меньшая мощность и используется меньше дизелей, что приводит к уменьшению расхода топлива и выбросов ВВ.

Результаты сертификационных испытаний Genset привели к выводу, что выбросы y_1, y_2 практически сократились на треть, y_3 – в пять раз, y_4 – в 10 раз по отношению к маневровому тепловозу-прототипу. Следовательно, Genset удовлетворяет Tier3 [23]. При этом $c=1$, так как его двигатели начали производиться до 2000 г. [24]. Оценки выбросов этим тепловозом определяются из приведённых относительных характеристик их снижения, и равны: $y_1=3,3; y_2=0,96; y_3=35,20; y_4=1,3$ г/кВт-ч. Далее, поскольку этот тепловоз эксплуатировался более десяти лет, то степень его эксплуатации $e=4$. Сворачивая классы согласно алгоритму (рис. 1) и матрицам (табл. 5), получаем $q_1=2, q_2=3, q_3=0, q_4=1, q^C=3, q^G=2, q^E=1$. Таким образом, тепловоз-прототип относится к первому классу экологичности.

Определим теперь класс экологичности тепловоза Genset с шестью двигателями при сертификационных испытаниях $e=0$. Поскольку его двигатели были поставлены на производство после 2005 г. [24], то тепловоз Genset относится к стадии 2 (т.е. $c=2$). Поскольку этот тепловоз был сертифицирован по Tier 3, то из таблицы 2 (при $c=2$) получаем $y_1=2,09, y_2=0,60, y_3=7,04, y_4=0,13$. Сворачивая классы согласно алгоритму (рис. 1) и матрицам, приведённым в таблице 5, получаем $q_1=3, q_2=2, q_3=2, q_4=3, q^C=3, q^G=3, q^E=3$. Таким образом, тепловоз Genset относится к высшему – третьему классу экологичности. Соответственно, его разработчики заслужили поощрение $V_{20}(3)$.

Заключение

В статье предложен механизм оценки и побуждения к снижению выбросов в атмосферу парниковых газов и мелких частиц от сжигания топлива при эксплуатации тепловозов. Предлагаемая процедура формирования интегральной оценки по разным компонентам ВВ основывается на использовании ограничений

по этим выбросам, зафиксированных в российских и зарубежных стандартах. На основе вычисления интегральных оценок выбросов разработана процедура классификации эксплуатируемых тепловозов. Приведённые примеры классификации уровней экологичности для ряда прототипов тепловозов иллюстрируют предложенный механизм экологизации и показывают возможности сравнения типов эксплуатируемых тепловозов по степени их вредного воздействия на окружающую среду. Учёт отечественных и международных требований к выбросам ВВ тепловозами при формировании классов экологичности определяет согласованность предложенного механизма с указанными требованиями.

Принципы построения предложенного механизма позволяют применить его при оценке вредного воздействия эксплуатации каждого типа тепловоза на окружающую среду по разработанному алгоритму.

Результаты статьи были использованы при формировании концепции требований к эксплуатируемым тепловозам ОАО «РЖД» в области охраны окружающей среды.

Общность подхода к формированию механизма оценки вредного воздействия выбросов эксплуатируемых тепловозов позволяет рассчитывать на его успешное применение в дальнейших исследованиях для оценки экологических воздействий других видов транспорта, использующих для тяги дизельные двигатели, например, для морских и речных судов.

Литература

1. Караулов В.М., Караулова Л.В., Пугач В.Н., Каранина Е.В. Экологическая эффективность экономики как основа устойчивого развития региона // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 211–224. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-211-224
2. Райкова С.В., Гусев Ю.С., Мазилев С.И., Поздняков М.В., Комлева Н.Е., Микеров А.Н. Влияние загрязнителей атмосферного воздуха на здоровье человека (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 6–15. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-006-020
3. Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Тимонов А.С., Домнина Е.А., Дабах Е.В., Сырчина Н.В., Кондакова Л.В., Кутявина Т.И., Скугорева С.Г., Огородникова С.Ю., Рутман С.Ю., Кузнецов Д.А. Мониторинг атмосферного воздуха в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 38–46. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-038-046
4. Сырчина Н.В., Кантор Г.Я., Пугач В.Н., Ашихмина Т.Я. Вклад углекислого газа и воды в парниковый эффект

факт // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 218–223. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223

5. Karanina E.V., Ilysheva N.N., Baldesku E.V., Toporkova A.F. Corporate carbon management system // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 215–221. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-215-221

6. Малышев А.А., Солодков Н.Н., Коробкова Н.А. Формирование модели управления экологизированным производством // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 93–100. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-093-100

7. Макарова Н.М., Балашов А.Л., Тойгильдин А.М., Свирский А.Г. Особенности создания систем автоматического контроля загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 35–43. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-035-043

8. Савосина М.И. Оценка эффективности устойчивого развития транспорта // Мир транспорта. 2020. Т. 18. № 2. С. 50–66. doi: 10.30932/1992-3252-2020-18-50-66

9. Transport technologies and policy scenarios to 2050. London: World Energy Council, 2007. 139 p.

10. About transportation & climate change: transportation's role in climate change: overview – DOT Transportation and climate change clearinghouse [Электронный ресурс] <https://web.archive.org/web/20151031215015/http://climate.dot.gov/about/transportations-role/overview.html> (Дата обращения: 20.06.2025).

11. Kim M.-K., Park D., Kim D.Y. Quantification of the ecological value of railroad development areas using logistic regression analysis // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. V. 18. No. 22. Article No. 11764. doi: 10.3390/ijerph182211764

12. Plev S., Stanchev H., Mitev E. An experimental comparison of emissions of a common-rail diesel engine fueled with ethanol and butanol additives // Transport, ecology – sustainable development: EKO Varna 2022: AIP conference proceedings. 2023. V. 2868. No. 1. Article No. 020018. doi: 10.1063/5.0165370

13. Цыганов В.В., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Механизм проектирования экологических дизель-электровозов // Экология промышленного производства. 2025. № 3. С. 57–62. doi: 10.52190/2073-2589_2025_3_57

14. Цыганов В.В., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Прогрессивный механизм экологичной модернизации тепловозов // Экология и промышленность России. 2025. Т. 29. № 7. С. 59–65. doi: 10.18412/1816-0395-2025-7-59-65

15. Цыганов В.В., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Механизмы устойчивого развития железнодорожного транспорта путём капитального ремонта тепловозов // Управление большими системами. 2025. № 117. С. 286–319. doi: 10.25728/ubs.2025.117.14

16. Final rule for control of emissions of air pollution from locomotive engines. Emission factors for locomotives [Электронный ресурс] <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-control>

emissions-air-pollution-locomotive (Дата обращения: 10.02.2025).

17. Regulatory impact analysis: control of emissions of air pollution from locomotive engines. Current U.S. emission regulations [Электронный ресурс] <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10023S4.PDF?DockKey=P10023S4.PDF> (Дата обращения: 10.02.2025).

18. Emission standards. EU: Nonroad engines [Электронный ресурс] <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php> (Дата обращения: 10.02.2025).

19. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: ЛЕНАНД, 2022. 500 с.

20. Цыганов В.В., Малыгин И.Г., Еналеев А.К., Савушкин С.А. Большие транспортные системы: теория, методология, разработка и экспертиза. СПб.: ИПТ РАН, 2016. 216 с.

21. Маневровые тепловозы ТЭМ1 для промышленного железнодорожного транспорта. Нижний Тагил: Объединение производителей железнодорожной техники, АО ЕВРАЗ, 2023. 24 с.

22. Florentsev S., Polyukhovych V., Evpakov V. Modernization of industrial shunting diesel locomotives for technological railway transport // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. Magnitogorsk: IEEE, 2022. P. 64–68. doi: 10.1109/Ural-Con54942.2022.9906764

23. Genset switcher. Cleaner locomotives [Электронный ресурс] https://www.up.com/cs/groups/public/@uprr/@environment/documents/up_pdf_nativedocs/pdf_up_emg_genset.pdf (Дата обращения: 10.02.2025).

24. GE Transportation. Early locomotive models [Электронный ресурс] <http://www.getransportation.com/rail/rail-products/locomotives/earlier-locomotive-models.html> (Дата обращения: 10.02.2025).

References

1. Karaulov V.M., Karaulova L.V., Pugach V.N., Karanina E.V. Eco-efficiency as the basis for sustainability development of the region // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 4. P. 211–224 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-211-224

2. Raikova S.V., Gusev Yu.S., Mazilov S.I., Pozdnyakov M.V., Komleva N.E., Mikerov A.N. Effects of atmospheric air pollutants on human health (overview) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 6–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-006-020

3. Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Timonov A.S., Domnina E.A., Dabakh E.V., Syrchina N.V., Kondakova L.V., Kut'yavina T.I., Skugoreva S.G., Ogorodnikova S.Yu., Rutman V.V., Kuznetsov D.A. Atmospheric air monitoring in the area of enterprises for the disposal of hazardous industrial waste // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 38–46 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-038-046

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. Karanina E.V., Plysheva N.N., Baldesku E.V., Toporkova A.F. Corporate carbon management system // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 215–221. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-215-221

6. Malyshev A.A., Solodkov N.N., Korobkova N.A. Formation of a green production management model // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 2. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-093-100

7. Makarova N.M., Balashov A.L., Toygildin A.M., Svirskiy A.G. Features of creating systems for automatic control of pollutants from stationary sources of emission // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 35–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-035-043

8. Savosina M.I. Assessment of effectiveness of sustainable transport development // World of Transport and Transportation. 2020. V. 18. No. 2. P. 50–66 (in Russian). doi: 10.30932/1992-3252-2020-18-50-66

9. Transport technologies and policy scenarios to 2050. London: World Energy Council, 2007. 139 p.

10. About transportation & climate change: transportation's role in climate change: overview – DOT Transportation and climate change clearinghouse [Internet resource] <https://web.archive.org/web/20151031215015/http://climate.dot.gov/about/transportations-role/overview.html> (Accessed: 20.06.2025).

11. Kim M.-K., Park D., Kim D.Y. Quantification of the ecological value of railroad development areas using logistic regression analysis // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. V. 18. No. 22. Article No. 11764. doi: 10.3390/ijerph182211764

12. Iliev S., Stanchev H., Mitev E. An experimental comparison of emissions of a common-rail diesel engine fueled with ethanol and butanol additives // Transport, ecology – sustainable development: EKO Varna 2022: AIP conference proceedings. 2023. V. 2868. No. 1. Article No. 020018. doi: 10.1063/5.0165370

13. Tsyganov V., Enaleev A., Savushkin S. Mechanism for improving the environmental friendliness of diesel-electric locomotives // Industrial ecology (IE). 2025. No. 3. P. 57–62 (in Russian). doi: 10.52190/2073-2589_2025_3_57

14. Tsyganov V., Yenaleev A., Savushkin S. Progressive mechanism of environmentally friendly modernisation of diesel locomotives // Ecology and Industry of Russia. 2025. V. 29. No. 7. P. 59–65 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2025-7-59-65

15. Tsyganov V., Enaleev A., Savushkin S. Mechanisms of sustainable development of railway transport by means of capital repairs of diesel locomotives // Large-Scale Systems Control. 2025. No. 117. P. 286–319. doi: 10.25728/ubs.2025.117.14

16. Final rule for control of emissions of air pollution from locomotive engines. Emission factors for locomotives [Internet resource] <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-control-emissions-air-pollution-locomotive> (Accessed: 10.02.2025).

17. Regulatory impact analysis: control of emissions of air pollution from locomotive engines. Current U.S. emission regulations [Internet resource] <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10023S4.PDF?Dockkey=P10023S4.PDF> (Accessed: 10.02.2025).

18. Emission standards. EU: Nonroad engines [Internet resource] <https://dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php> (Accessed: 10.02.2025).

19. Novikov D.A. Organizations control theory. Moskva: LENAND, 2022. 500 p. (in Russian).

20. Tsyganov V., Malygin I., Enaleev A., Savushkin S. Large scale transport systems: theory, methodology, devel-

opment and expertise. Sankt-Peterburg: IPT RAN, 2016. 216 p. (in Russian).

21. TEMP shunting diesel locomotives for industrial rail transport. Nizhny Tagil: Obedinenie proizvoditeley zheleznodorozhnoy tekhniki, EVRAZ JSC, 2023. 24 p. (in Russian).

22. Florentsev S., Polyukhovych V., Evpakov V. Modernization of industrial shunting diesel locomotives for technological railway transport // International Ural Conference on Electrical Power Engineering. Magnitogorsk: IEEE, 2022. P. 64–68. doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906764

23. Genset switcher. Cleaner locomotives [Internet resource] https://www.up.com/cs/groups/public/@uprr/@environment/documents/up_pdf_nativedocs/pdf_up_emg_genset.pdf (Accessed: 10.02.2025).

24. GE Transportation. Early locomotive models [Internet resource] <http://www.getransportation.com/rail/rail-products/locomotives/earlier-locomotive-models.html> (Accessed: 10.02.2025).

Изучение возможности использования композиционных сорбентов для очистки вод от нефтепродуктов при пониженных температурах

© 2026. Е. А. Татаринцева¹, к. т. н., доцент,
Л. Н. Ольшанская², д. х. н., профессор,

¹Тольяттинский государственный университет,

445020, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14 (центральный кампус),

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,

e-mail: tatarinceva-elen@mail.ru, ecos123@mail.ru

Освоение нефтяных месторождений в Арктическом регионе связано с высокими рисками загрязнения окружающей природной среды. Увеличение объёмов добычи углеводородов сопровождается обеспокоенностью касательно уровня подготовки к возможным аварийным ситуациям, связанным с утечками нефти. Инфраструктура большинства районов Крайнего Севера не соответствует требованиям для оперативного устранения масштабных загрязнений окружающей среды, возникающих вследствие производственной деятельности нефтяных компаний. Целью работы явилось изучение возможности использования композиционных сорбционных материалов, изготовленных из отходов промышленности, для очистки воды от разливов нефти при температурах от -5 до $+20$ °С. Изучены физико-механические свойства материалов, которые являются важной характеристикой сорбентов: механическая прочность, удельная поверхность, которая составляет от 20 до 35 м²/г, плотность < 1 см³/г, пористость сорбентов, представляющая совокупность макро- и мезопор около 80–90 %. Показано, что предложенные сорбенты обладают гидрофобностью, которая подтверждается высокой величиной краевого угла смачивания (130 – 140°) и хорошей плавучестью в течение 96 ч. Время сорбции нефти с эффективностью очистки более 99,0 % составляет 20 мин. Нефтеёмкость полученных материалов для сбора нефти при пониженных температурах (-5 °С) составляет от 3 до 22 г/г. Получен сорбент с магнитными свойствами за счёт содержания ферритизированного гальваношлама, что значительно упрощает процесс сбора его с поверхности воды. Полученные сорбционные материалы решают проблему не только очистки воды от нефти, но и проблему получения дешёвых сорбентов из отходов промышленности, таких как полиэтилентерефталат, гальваношлам, древесные опилки.

Ключевые слова: сорбент, очистка воды, нефтезагрязнение, оксид графена, полиэтилентерефталат, ферритизированный гальваношлам, магнитосорбент, отходы промышленности.

Study of the possibility of using composite sorbents to purify water from oil products at low temperatures

© 2026. Е. А. Tatarintseva¹ ORCID: 0000-0002-5925-3227[?]

L. N. Olshanskaya² ORCID: 0000-0002-8449-9368[?]

¹Togliatti State University,

14, Belorusskaya St., Togliatti, Russia, 445020,

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

77, Politekhnikeskaya St., Saratov, Russia, 410054,

e-mail: tatarinceva-elen@mail.ru, ecos123@mail.ru

The development of oil fields in the Arctic is associated with high risks of environmental pollution. Increased hydrocarbon production is accompanied by concerns regarding the level of preparedness for potential emergency situations associated with oil spills. The infrastructure in most areas of the Far North does not meet the requirements for the prompt elimination of large-scale environmental pollution arising from oil production activities. The aim of this study was to study the feasibility of using composite sorption materials made from industrial waste to purify water from oil spills at temperatures ranging from -5 to $+20$ °C. We studied the physicochemical properties as the important characteristics of sorbents. Specific surface area of the studied sorbents ranges from 20 to 35 м²/g, density is < 1 см³/g, porosity is approximately 80–90 %, and mechanical strength is high. The proposed sorbents were shown to possess hydrophobic properties, as evidenced by a high contact angle (130° – 140°) and good buoyancy for 96 hours. The oil sorption time with

a purification efficiency exceeding 99.0 % is 20 minutes. The oil absorption capacity of the obtained materials for oil recovery at low temperatures (-5°C) ranges from 3 to 22 g/g. A sorbent with magnetic properties was obtained due to the content of ferritized galvanic sludge, significantly simplifying the process of its collection from the water surface. The obtained sorption materials solve the problem of water purification from oil as well as the problem of producing low-cost sorbents from industrial waste such as polyethylene terephthalate, galvanic sludge, and sawdust.

Keywords: sorbent, water purification, oil pollution, graphene oxide, polyethylene terephthalate, ferritized galvanic sludge, magnetosorbent, industrial waste.

В связи с истощением традиционных нефтяных месторождений, активно развивается нефтедобыча в Арктике, где сосредоточено до 240 млрд т нефти. В суровых условиях арктической добычи и эксплуатации необходимо внедрять передовые технологии не только для извлечения ресурсов, но и для устранения последствий аварий. Продолжительное воздействие низких температур замедляет биологические процессы в водных и почвенных экосистемах. Соответственно, методы предотвращения и ликвидации разливов нефти существенно отличаются от используемых на «традиционных» месторождениях.

Согласно постановлению Правительства РФ от 31.12.2020 № 2451 (с изменениями на 11.12.2023), предприятия, осуществляющие деятельность в области геологического изучения, разведки и добычи углеводородного сырья, а также переработки (производства), транспортировки, хранения, реализации углеводородного сырья и произведённой из него продукции, обязаны иметь финансовое обеспечение для осуществления мероприятий, предусмотренных планом предупреждения и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов (НП).

Оперативная локализация разливов НП, как показал опыт ликвидации загрязнений в Чёрном море, имеет первостепенное значение из-за огромного вреда окружающей среде.

Для очистки от тонкой нефтяной плёнки применяются физико-химические методы, однако диспергенты, используемые при этом, токсичны для морских организмов и создают «мёртвые зоны». Многие эмульгаторы содержат токсичные ароматические углеводороды, а осевшая на дно нефть уничтожает придонную фауну [1, 2].

Для удаления НП из вод используют разнообразные сорбционные материалы, среди которых особое внимание уделяется плавающим сорбентам. К эффективным видам относятся сорбенты, изготовленные из натуральных компонентов, таких как мох, торф, древесные опилки, солома, шерсть животных, перья птиц и листья деревьев [3, 4] или синтетических веществ, включая резину,

полиуретан, кокс и целлюлозу [5]. Наряду с этим используют карбонатный шлам, отход теплоэлектростанций, модифицированный кремнийорганическими соединениями для повышения сорбционной способности, а также предлагается применение шламов содового производства для ликвидации разливов нефти [6, 7]. Наиболее эффективны углеродные сорбенты, особенно пористые материалы, такие как гидрофобный вспученный перлит, угольные адсорбенты и терморасширенный графит [8]. Широко применяются синтетические сорбенты из полипропиленовых волокон, а также гранулированный полиуретан и другие виды пластиков [9]. В качестве сорбентов могут использоваться отходы различных производств, такие как зола, коксовая мелочь, силикагели и алюмогели, а также отходы деревообработки и целлюлозной промышленности, растительные отходы и рисовая шелуха [10]. Также возможно получение ферромагнитного сорбента из отходов производства неорганических веществ.

Физико-химические методы эффективны только для удаления нефти в виде плавающего слоя. Традиционные технологии очистки вод от нефти и НП многоступенчаты и включают в себя локализацию, сбор, рекультивацию. Эти методы трудоёмки, требуют больших затрат времени и ресурсов и не обеспечивают полной очистки воды от поверхностной, растворённой и эмульгированной нефти.

Целью данной работы являлось исследование эффективности очистки воды от плёнок нефти и нефтепродуктов сорбентами на основе различных промышленных отходов.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны разработанные композиционные сорбционные материалы (КСМ) на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) (сорбент 1) [11], таблетированный сорбционный материал на основе окисленного графита (ОГ) (сорбент 2) [12] и материал с использованием ферритизированного гальваношлама (ФГШ), опилок и парафина (сорбент 3), представляющий

собой смесь магнетитов и ферритов тяжёлых металлов, обладающий магнитными свойствами [13, 14].

Моделирование загрязнения воды проводили путём разлива в пробах модельной морской воды различных количеств нефти (плотность 894 кг/м³, вязкость до 30 мПа·с). Модельную морскую воду готовили, растворяя морскую соль в дистиллированной воде, доводя концентрацию до 32–35 ‰, что характерно для северных морей.

Исследование сорбционной ёмкости материалов проводили при отрицательных и положительных температурах воды. При моделировании разлива нефти и НП на поверхности воды сорбент равномерно распределяли по поверхности нефтяного пятна, сорбцию проводили в течение 30 мин, а затем извлекали его вместе с адсорбированным продуктом и взвешивали.

Измерение массовой концентрации НП выполняли ИК-спектрофотометрическим методом на концентратометре серии КН-3 (ООО СИБЭКОПРИБОР, Россия). Предел допускаемой основной абсолютной погрешности прибора при соблюдении нормальных условий составляет $\pm(0,50+0,05 \cdot C_x)$ мг/дм³ для НП, где C_x – измеряемая величина массовой концентрации НП в экстрагенте (четырёххлористом углеводе).

Плаваемость полученных нефтесорбентов определяли в соответствии с методикой, описанной для нефтяных сорбентов [15].

Результаты по смачиваемости исследуемых сорбционных материалов получены при экспериментальной реализации методики, заключающейся в измерении краевых углов сидящей капли, образуемой на поверхности сорбента [16]. Каплю наносили на уплотнённый слой сорбента, фотографировали и по её профилю определяли величину краевого угла смачивания.

Нефтеёмкость сорбентов определяли стандартным методом по разнице массы сорбента, напитавшегося НП, и чистого сорбента в расчёте на 1 г воздушно-сухого вещества.

Эффективность очистки (Э, %) модельных систем воды исследуемыми сорбентами рассчитывали по формуле:

$$\text{Э} = \frac{C_n - C_p}{C_n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где C_n – начальная концентрация, мг/дм³; C_p – равновесная концентрация, мг/дм³.

Сорбционную ёмкость материалов (А, мг/г; г/г) определяли по формуле:

$$A = \frac{(C_n - C_p) \cdot V_{p-pa}}{m_{сорб.}}, \quad (2)$$

где C_n – начальная концентрация, мг/дм³; C_p – равновесная концентрация, мг/дм³; V_{p-pa} – объём раствора, дм³; $m_{сорб.}$ – масса сорбента, г.

Все исследования проводили в трёхкратной повторности, что позволило провести статистическую обработку данных, подтвердить достоверность полученных результатов и оценить их точность. В ходе исследований результаты подвергались статистическому анализу с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2010 и встроенного инструмента «Описательная статистика».

Результаты и обсуждение

При авариях на северных месторождениях нефть оказывает значительное негативное воздействие на хрупкую экосистему региона, восстановление которой занимает длительное время. Низкие температуры оказывают двойственное влияние на ликвидацию последствий загрязнений. Преимущества низкой температуры заключаются в том, что повышенная вязкость НП замедляет распространение нефти при утечках, наличие ледяного покрова препятствует распространению нефти.

В качестве недостатков можно отметить замедление биохимического разрушения нефти, образование толстой плёнки на поверхности воды, образование устойчивых эмульсий.

Ключевым фактором успешного устранения аварии становится быстрота реагирования служб экологической защиты.

Кроме того, свойства разных сортов нефти различаются из-за различного содержания тяжёлых и лёгких компонентов, влияющих на физические характеристики продукта. Основными свойствами нефти являются плотность, вязкость, летучесть, температура застывания. Различные составы нефти Арктической зоны России имеют температуру застывания от –30 до –5 °С [17]. Снижение температуры ведёт к уменьшению текучести нефти, однако интенсивность этого процесса варьирует в зависимости от химического состава самой нефти.

Основными свойствами нефтесорбентов являются: сорбционная ёмкость, гидрофобность, плаваемость, механическая прочность, химическая стойкость, экологическая безопасность.

Проведённый анализ свойств полученных на основе ПЭТФ, ОГ и ФГШ с добавлением

Е. А. Татаринцева, Л. Н. Ольшанская
«Изучение возможности использования
композиционных сорбентов для очистки вод
от нефтепродуктов при пониженных температурах». С. 145.



а / а

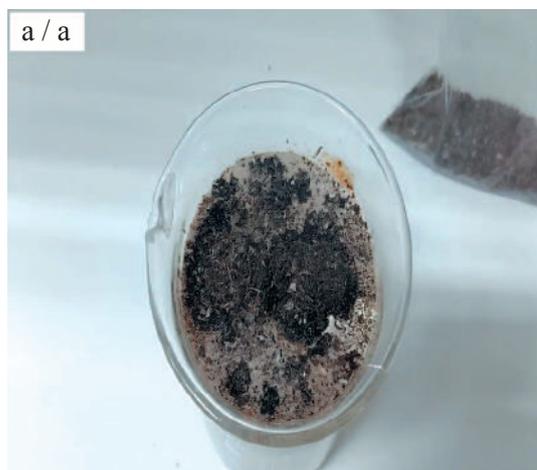


б / б

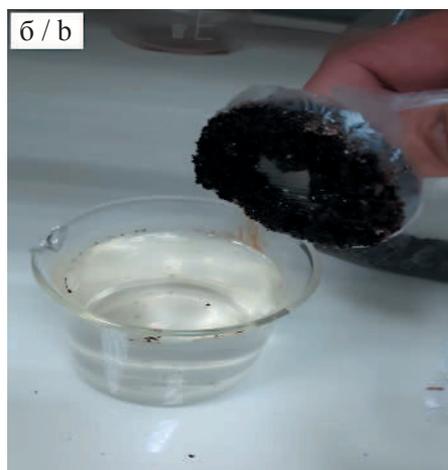


в / с

Рис. 1. Внешний вид сорбентов 1 (а), 2 (б), 3 (в)
Fig. 1. Appearance of sorbents 1 (a), 2 (b), and 3 (c)



а / а



б / б

Рис. 5. Удаление нефти сорбентом 3 (а) и сбор сорбента 3 с поверхности воды с помощью магнита (б)
Fig. 5. Removal of oil by sorbent 3 (a) and collection of sorbent 3 from the water surface using a magnet (b)

Таблица 1 / Table 1

Физико-механические свойства сорбционных материалов
Physical and mechanical properties of sorption materials

Сорбент Sorbent	Размер частиц, мм Particle size, mm	Удельная поверхность, м ² /г Specific surface area, m ² /g	Распределение пор по размерам, нм / количество, % Pore size distribution, nm/number, %	Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	Измельчаемость, % Grindability, %*	Истираемость, % Abrasion resistance, %**
Сорбент 1 Sorbent 1	0,05±0,01	20±1	2–50 / 89%	0,80±0,04	0,10±0,01	0,07±0,01
Сорбент 2 Sorbent 2	10,0 ±0,5	42±2	2–50 / 70% ≥50 / 21%	0,35±0,02	3,20±0,16	0,40±0,02
Сорбент 3 Sorbent 3	2,0±0,1	35±2	16–50 / 80%	0,90±0,04	2,5±0,12	1,50±0,07

Примечание: по ГОСТ Р 51641-2000: * ≤ 4 %; ** ≤ 0,5 %.
Note: according to GOST R 51641-2000: * ≤ 4 %; ** ≤ 0.5 %.

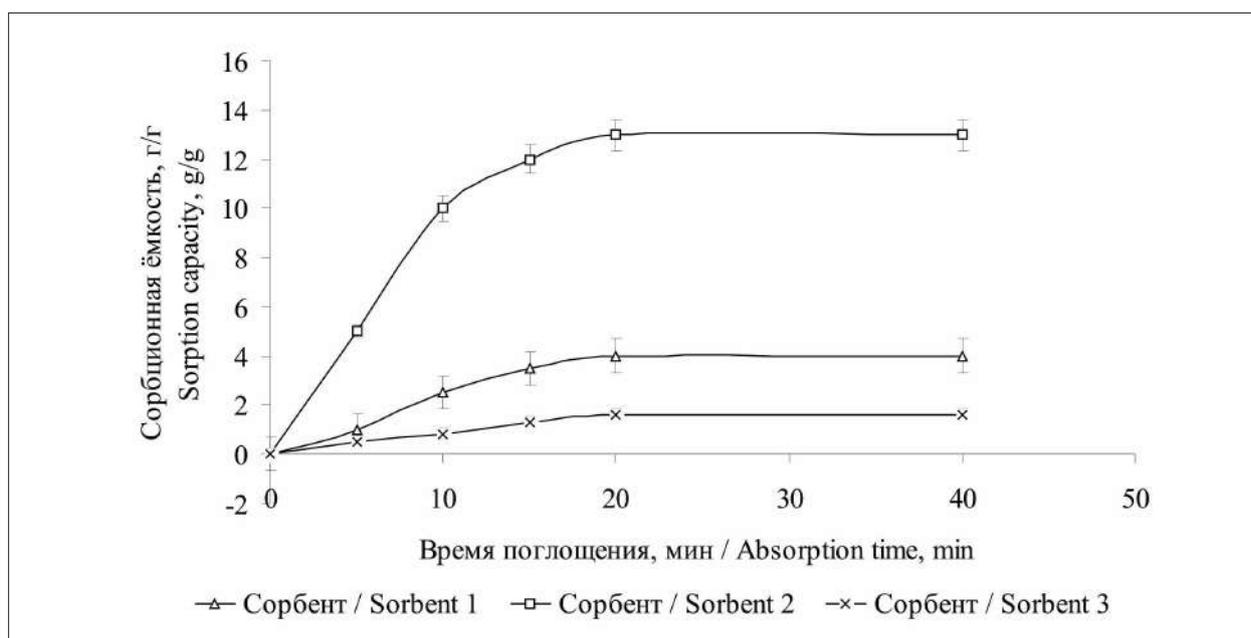


Рис. 2. Кинетические кривые сорбции нефти разработанными сорбентами
Fig. 2. Kinetic curves of oil sorption by the obtained sorbents

опилок и парафина сорбционных материалов показал, что они обладают достаточной механической прочностью (истираемость, измельчаемость), имеют высокую удельную поверхность и пористость, что способствует их хорошей сорбционной способности по отношению к НП (табл. 1).

Сорбенты представляют собой частицы разного размера, от нескольких мкм до 1 см (рис. 1, см. цв. вкладку II).

Определялась скорость впитывания нефти сорбентами (рис. 2). По мнению специалистов, ледяной покров способствует ограничению распространения нефтяных пятен, что даёт возможность подготовиться к

очистке загрязнённой территории. Масштаб загрязнения напрямую зависит от скорости удаления нефтяного пятна. Быстрое удаление предотвращает проникновение нефти в донные отложения и защищает водные организмы от токсичного воздействия продуктов распада нефти.

Результаты исследования кинетики процесса сорбции модифицированными РСМ показали (рис. 2), что сорбционное равновесие при извлечении НП наступает примерно за 20 мин. Выяснено, что в начальные моменты взаимодействия сорбенты демонстрируют наивысшую поглощающую способность, благодаря чему нефтяные загрязнения эф-

фактивно удерживаются этими материалами, что обусловлено их отличными гидрофобными и олеофильными свойствами.

Гидрофобность сорбентов подтверждается высокой величиной краевого угла смачивания, который составляет 130° – 140° . Чем сильнее гидрофобность, тем ниже вероятность намокания и утяжеления сорбента, что обеспечивает стабильность его поведения на воде при поглощении нефтезагрязнений. В таблице 2 представлены исследования плавучести сорбционных материалов.

Высокая плавучесть сорбентов 2 и 3 (табл. 2) обусловлена не только сильной водоотталкивающей способностью, но и наличием пористой структуры материалов. Пористые структуры обеспечивают и лучшие показатели плавучести, благодаря наличию воздушных полостей, компенсирующих массу самого материала [18].

Изучены адсорбционные характеристики анализируемых сорбентов, учитывая температурный фактор и уровень минерализации воды. Исследования проводили

при температурах модельной морской воды (концентрация соли до 32–35 ‰) от -5 до $+20$ °C (рис. 3).

Результаты исследований демонстрируют, что снижение температуры воды влечёт за собой увеличение поглощающей способности сорбционного материала приблизительно в 2,5 раза, что обусловлено возрастанием вязкости НП. Различия в форме кривых (рис. 3) объясняются динамикой изменения вязкости в зависимости от температуры. При более низких температурах воды сорбционная способность материалов увеличивается, что связано с усилением адгезионных взаимодействий между сорбентом и сорбатом.

Согласно литературным данным [9], сорбция НП в пресной воде примерно на 5 % ниже. Это объясняется более высоким поверхностным натяжением на границе раздела фаз вода-нефть в морской воде, а также увеличенной плотностью солёной воды, что оказывает влияние на процессы взаимодействия нефти и воды, облегчая сорбцию на поверхности солёной воды [9].

Таблица 2 / Table 2

Плавучесть сорбционных материалов, % / Buoyancy of sorption materials, %

Материал / Material	Время, ч / Time, h			
	24	48	72	96
Сорбент 1 / Sorbent 1	100	100	98	80
Сорбент 2 / Sorbent 2	100	100	100	100
Сорбент 3 / Sorbent 3	100	100	100	100

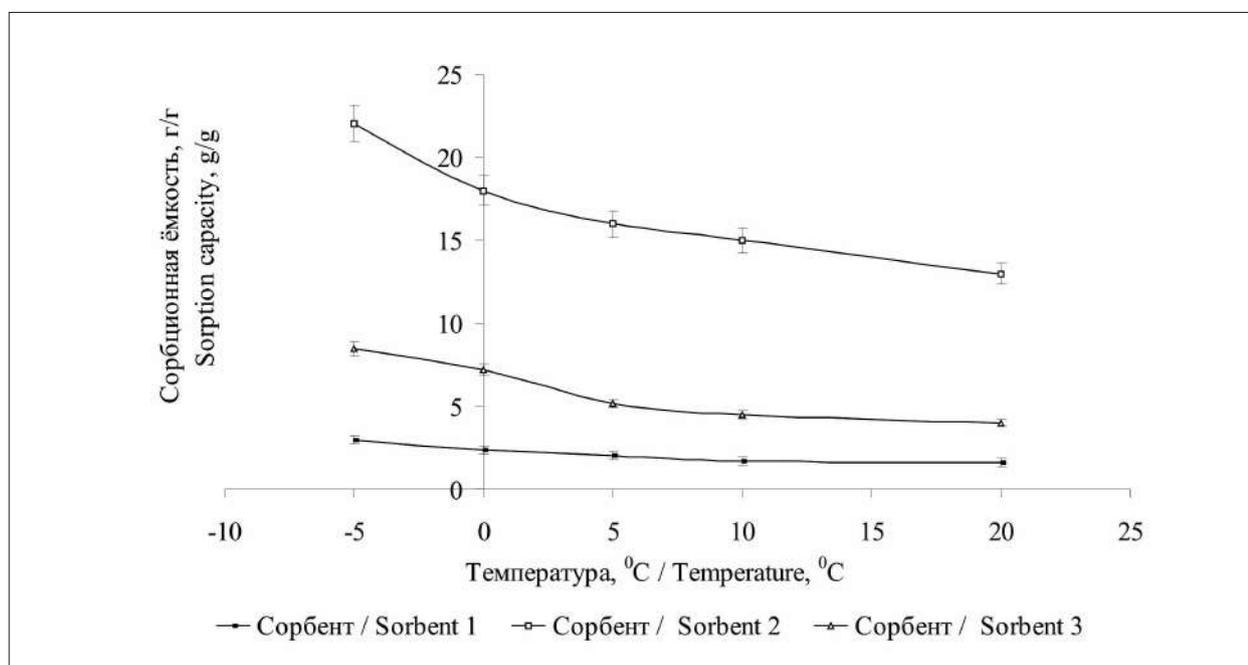


Рис. 3. Изменение нефтеемкости сорбентов в зависимости от температуры воды
Fig. 3. Change in oil capacity of sorbents depending on water temperature

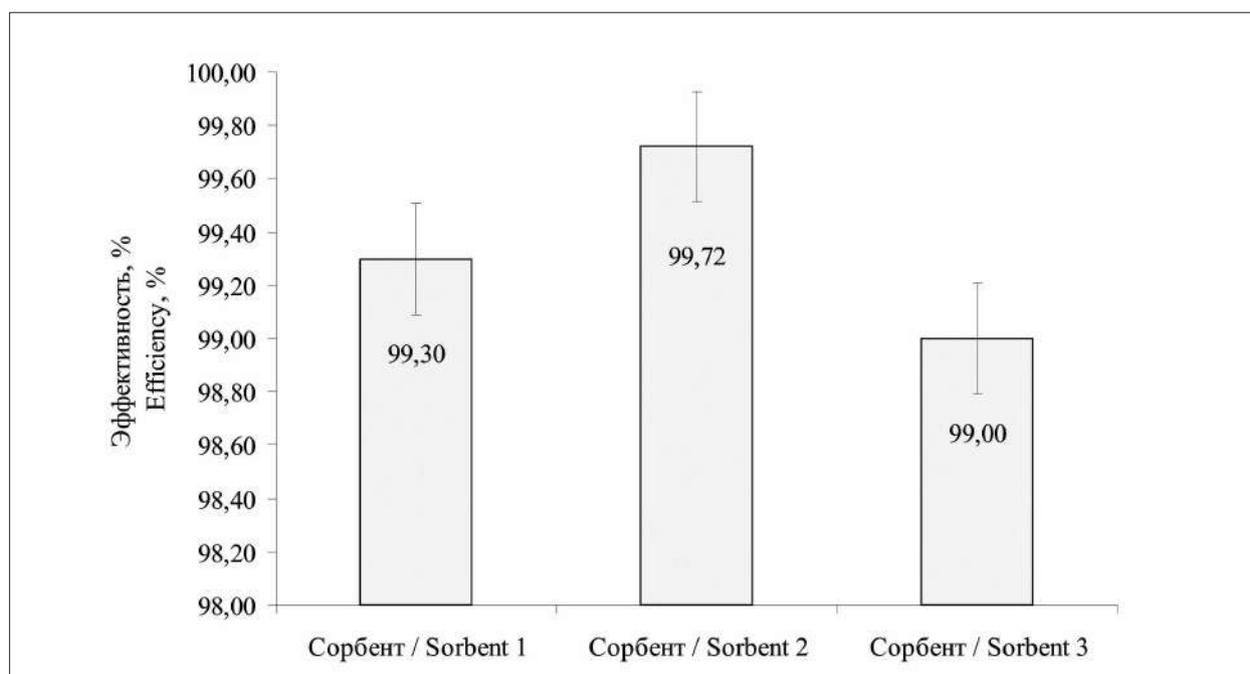


Рис. 4. Эффективность очистки модельной морской воды от плёнок нефти с использованием сорбентов / Fig. 4. Efficiency of model seawater purification from oil films using sorbents

Повышение температуры воды приводит к уменьшению сорбционной ёмкости НП, что характеризует экзотермический процесс и свидетельствует о физической природе сил адсорбции.

Изучение эффективности очистки модельной морской воды от плёнок нефти проводили при +20 °С, имитируя разлив нефти в ёмкости с водой объёмом 100 мл. Нефть приливали до толщины плёнки 2 мм и насыпали на поверхность 1 г сорбционного материала. По результатам эксперимента эффективность очистки составила более 99,0 % для всех сорбентов (рис. 4).

Следов нефти на поверхности воды и стенках посуды не обнаружено (рис. 5, см. цв. вкладку II). Для измерения массовой концентрации НП использовали концентратомер марки «КН-3». Степень очистки водной поверхности от НП при использовании сорбционных материалов определяется количеством применяемого сорбционного материала и может достигать значений 99,9 %.

Сбор сорбентов с поверхности воды после завершения процесса очистки является важной частью процедуры восстановления водных объектов после аварийных разливов нефти и других опасных веществ. Сорбенты либо убираются вручную с помощью специального оборудования (сети, грабли, совки) для удаления частиц насыщенного нефтью сорбента с поверхности воды, либо для этого

используют специализированные устройства, такие как вакуумные установки и скиммеры, которые автоматически собирают сорбированные нефтезагрязнения с поверхности водоёма. Выбор метода зависит от объёма загрязнений, характера водоёма и доступности оборудования.

Сорбент 3 обладает магнитными свойствами за счёт содержания ФГШ [19], что значительно упрощает процесс сбора его с поверхности воды, используя магнит (рис. 5).

Сорбент 3 может быть особенно эффективен при удалении нефтезагрязнений вблизи береговой линии, где есть растительность и неровности рельефа.

Выбор оптимального сорбционного материала снижает затраты на очистительные мероприятия. Высокие параметры процесса очистки водной поверхности (скорость сорбции, нефтеёмкость материалов, плавучесть) позволяют сократить количество используемого сорбента и ускорить процедуру восстановления природных ресурсов.

Освоение нефтяных месторождений в Арктическом регионе вызывает серьёзную озабоченность среди экспертов и общественности. Увеличение объёмов добычи углеводородов сопровождается беспокойством касательно уровня подготовки к возможным аварийным ситуациям, связанным с утечками нефти. Инфраструктура большинства районов Крайнего Севера не соответствует требованиям

для оперативного устранения масштабных загрязнений окружающей среды, возникающих вследствие производственной деятельности нефтяных компаний [20, 21].

Заключение

Проведённые исследования показали возможность использования композиционных сорбционных материалов, изготовленных из отходов промышленности, для очистки морской воды от разливов нефти в диапазоне температур от -5 до $+20$ °С. Изучены физико-механические свойства предлагаемых материалов (удельная поверхность, плотность, пористость, механическая прочность), которые являются важной характеристикой сорбентов. Показано, что сорбенты содержат до 80–90 % мезопор, в которых хорошо сорбируются молекулы нефти. Установлено, что сорбенты обладают высокими показателями по гидрофобности и плавучестью до 96 ч, что позволяет их отнести к высокоплавучим сорбентам. Проанализированы нефтеёмкостные свойства материалов для сбора нефти при нормальных и пониженных температурах. Представленные сорбенты имеют такие преимущества, как магнитные свойства и высокая нефтеёмкость. Так, нефтеёмкость сорбентов на основе окисленного графита и материала с использованием ферритизированного гальваношлама, опилок и парафина (3,0–10 и 13–25 г/г, соответственно) превышает этот показатель для известных на рынке сорбционных материалов «Спилсорб» (9,0 г/г) и «Ньюсорб» (4,6–9,0 г/г). Данные о динамике сорбции нефти разработанными сорбентами показали, что время впитывания нефти составляет 20 мин, что меньше в 1,5–2 раза, чем у представленных на рынке сорбентов.

Физико-механические свойства и гидрофобность полученных композиционных сорбционных материалов (на основе ПЭТФ, ОГ и ФГШ с добавлением опилок и парафина) позволяют рекомендовать их для использования при очистке от разливов нефти в исследованном достаточно широком диапазоне температур от $+20$ до -5 °С.

Литература

1. Альжанов Б.А., Горовых О.Г. Содержание растворённых углеводородов нефти в объёме воды при использовании различных методов ликвидации аварийных разливов нефти // Тенденции и перспективы развития

современного научного знания: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд-во «Институт стратегических исследований»: Изд-во «Перо», 2015. С. 29–33.

2. Гуславский А.И., Канарская З.А. Перспективные технологии очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 20. С. 191–199.

3. Харлямов Д.А., Денисова Т.Р., Маврин Г.В., Шайхиев И.Г. Физико-химические и сорбционные свойства композиционных материалов на основе отходов деревообработки и синтетического магнетита // Вода: химия и экология. 2018. № 10–12 (117). С. 119–125.

4. Шайхиев И.Г., Санатуллова З.Т., Шайхиева К.И., Свергузова С.В. Шерсть и отходы её переработки в качестве сорбционных материалов. 2. Органических соединений // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 3. С. 103–109.

5. Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н. Сорбенты для очистки вод от нефтепродуктов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2010. 108 с.

6. Николаева Л.А., Лаптев А.Г., Бородай Е.Н., Новые возможности утилизации шламов химической водоподготовки на ТЭС // Вода: химия и экология. 2009. № 3. С. 2–5.

7. Калинина Е.В., Глушанкова И.С., Рудакова Л.В., Сабиров Д.О. Получение модифицированного сорбента на основе шламов содового производства для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов с поверхности воды // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 5. С. 30–35. doi: 10.18412/1816-0395-2018-5-30-35

8. Тангиева Д.Б., Темирханов Б.А., Султыгова З.Х., Арчакова Р.Д. Применение терморасширенного графита при ликвидации разливов нефти // Химия и химическое образование. XXI век: материалы Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Владикавказ: Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 2014. С. 207–210.

9. Мелкозеров В.М., Журавлев Д.Н., Шарипов И.А., Вильданов А.А., Васильев С.И. Исследование свойств полимерных сорбентов различных модификаций, используемых для устранения нефтепродуктов на водных акваториях арктической зоны // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2019. № 1. С. 49–54. doi: 10.33285/2411-7013-2019-1(286)-49-54

10. Панкеев В.В., Панова Л.Г., Свешникова Е.С. Модификация целлюлозосодержащих отходов, обеспечивающая создание сорбентов с высокой удельной нефтеёмкостью // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 7–2. С. 59–63.

11. Бухарова Е.А., Татаринцева Е.А., Ольшанская Л.Н. Получение сорбента на основе полиэтилентерефталата и его применение для очистки сточных и поверхностных вод от нефтепродуктов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. № 9. С. 31–34.

12. Бухарова Е.А., Татаринцева Е.А., Захаревич А.М. Изучение физико-химических и сорбционных свойств таблетированного сорбента на основе ТРГ // Журнал экологии и промышленной безопасности. 2014. № 1–2. С. 18–20.

13. Долбня И.В., Татаринцева Е.А., Козьмич К.В., Комиссаренко М.В., Шайхiev И.Г. Очистка нефтесодержащих сточных вод магнитосорбентами на основе ферритизированного гальваношлама // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 23. С. 154–156.

14. Бугера Ф. Особенности сбора нефтепродуктов с поверхности воды в условиях Севера // Экологические проблемы промышленных городов: сборник научных трудов 11-й Международной научно-практической конференции. Саратов: ООО «Амирит», 2023. С. 215–218.

15. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Удаление нефтепродуктов с водной поверхности и грунта. М.: Институт компьютерных исследований; Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2006. 525 с.

16. Витязь П.А., Шелег В.К., Капцевич В.М., Медведев В.Б., Мазюк В.В., Сорокина А.Н., Савич В.В. Определение краевого угла в капиллярно-пористых материалах // Заводская лаборатория. 1985. Т. 55. № 4. С. 53–55.

17. Яценко И.Г. Тяжёлая и вязкая нефть различных секторов Арктики // Neftegaz.RU. 2024. № 11. С. 60–68.

18. Заусалина А.В., Валь А.В., Боярко Г.Ю. Сравнительная эффективность сорбентов нефти и нефтепродуктов, используемых в условиях Томской области // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2015. № 2. С. 51–55.

19. Ольшанская Л.Н., Татаринцева Е.А., Лазарева Е.Н., Яковлева Е.В., Арефьева О.А. Энерго- и ресурсосберегающие технологии утилизации металлсодержащих гальваношламов // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 167–173. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-167-173

20. Knol M., Arbo P. Oil spill response in the Arctic: Norwegian experiences and future perspectives // Marine Policy. 2014. V. 50. Pt. A. P. 171–177. doi: 10.1016/j.marpol.2014.06.003

21. Павлов А.В., Васильева Ж.В. Исследование сорбентов нефти и нефтепродуктов для ликвидации аварийных разливов нефти в морях Арктического региона // Проблемы региональной экологии. 2019. № 5. С. 89–94. doi: 10.24411/1728-323X-2019-17089

References

1. Alzhanov B.A., Gorovykh O.G. Content of dissolved oil hydrocarbons in water using various methods of oil spill response // Trends and prospects for the development of modern scientific knowledge: materialy XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moskva: Izdatelstvo "Institut strategicheskikh issledovaniy": Izdatelstvo "Pero", 2015. P. 29–33 (in Russian).

2. Guslavskiy A.I., Kanarskaya Z.A. Promising technologies for cleaning water and soil from oil and oil products // Herald of Kazan Technological University. 2011. No. 20. P. 191–199 (in Russian).

3. Kharlyamov D.A., Denisova T.R., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G. Physicochemical and sorption properties of composite materials based on wood processing waste and synthetic magnetite // Water: Chemistry and Ecology. 2018. No. 10–12 (117). P. 119–125 (in Russian).

4. Shaikhiev I.G., Sanatullova Z.T., Shaikhieva K.I., Sverguzova S.V. Using wool and its processing wastes as sorption materials. 2. Organic compounds // Herald of Technological University. 2018. V. 21. No. 3. P. 103–109 (in Russian).

5. Sobgaida N.A., Olshanskaya L.N. Sorbents for water purification from oil products. Saratov: Saratov State Technological University, 2010. 108 p. (in Russian).

6. Nikolaeva L.A., Laptev A.G., Boroday E.N., New possibilities for recycling chemical water treatment sludge at thermal power plants // Water: Chemistry and Ecology. 2009. No. 3. P. 2–5 (in Russian).

7. Kalinina E.V., Glushankova I.S., Rudakova L.V., Sabirov D.O. Obtaining a modified sorbent based on soda production sludge for liquidation of oil and oil products spills from the water surface // Ecology and Industry of Russia. 2018. V. 22. No. 5. P. 30–35 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-5-30-35

8. Tangieva D.B., Temirkhanov B.A., Sultygova Z.Kh., Archakova R.D. Use of thermally expanded graphite in oil spill response // Chemistry and Chemical Education. XXI century: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Vladikavkaz: North Ossetian State University after K.L. Khetagurov. 2014. P. 207–210 (in Russian).

9. Melkozerov V.M., Zhuravlev D.N., Sharipov I.A., Vildanov A.A., Vasilyev S.I. Investigation of the properties of polymeric sorbents of various modifications used to solve oil spills in the water areas of the Arctic zone // Environmental protection in oil and gas complex. 2019. No. 1. P. 49–54 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2019-1(286)-49-54

10. Pankeev V.V., Panova L.G., Sveshnikova E.S. Modification of cellulose-containing waste, ensuring the creation of sorbents with high specific oil capacity // Engineering sciences – from theory to practice. 2012. No. 7–2. P. 59–63 (in Russian).

11. Bukharova E.A., Tatarintseva E.A., Olshanskaya L.N. Production of polyethylene terephthalate based sorbent and its use for waste and surface water cleaning from oil products // Chemical and petroleum engineering. 2014. No. 9. P. 31–34 (in Russian).

12. Bukharova E.A., Tatarintseva E.A., Zakharevich A.M. Study of the physicochemical and sorption properties of a TEG-based tableted sorbent // Journal of Ecology and Industrial Safety. 2014. No. 1–2. P. 18–20 (in Russian).

13. Dolbnya I.V., Tatarintseva E.A., Kozmich K.V., Komissarenko M.V., Shaikhiev I.G. Treatment of oil-

containing wastewater with magnetosorbents based on ferritized galvanic sludge // Herald of Technological University. 2016. V. 19. No. 23. P. 154–156 (in Russian).

14. Bugerara F. Features of oil products collecting from the water surface in the North // Environmental problems of industrial cities: sbornik nauchnykh trudov 11-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Saratov: Amirit LLC, 2023. P. 215–218 (in Russian).

15. Kamenshchikov F.A., Bogomolny E.I. Removal of oil products from the water surface and soil. Moskva: Institut kompyuternykh issledovaniy; Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2006. 525 p. (in Russian).

16. Vityaz P.A., Sheleg V.K., Kaptsevich V.M., Medvedev V.B., Mazyuk V.V., Sorokina A.N., Savich V.V. Determination of the contact angle in capillary-porous materials // Zavodskaya laboratoriya. 1985. V. 55. No. 4. P. 53–55 (in Russian).

17. Yashchenko I.G. Heavy and viscous oil from various sectors of the Arctic // Neftegaz.RU. 2024. No. 11. P. 60–68 (in Russian).

18. Zausalina A.V., Val' A.V., Boyarko G.Yu. Comparative efficiency of oil and oil products sorbents used in the Tomsk region conditions // Environmental protection in oil and gas complex. 2015. No. 2. P. 51–55 (in Russian).

19. Olshanskaya L.N., Tatarintseva E.A., Lazareva E.N., Yakovleva E.V., Arefieva O.A. Energy- and resource-saving technologies for utilization of metal-containing galvanic sludges // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 167–173 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-167-173

20. Knol M., Arbo P. Oil spill response in the Arctic: Norwegian experiences and future perspectives // Marine Policy. 2014. V. 50. Pt. A. P. 171–177. doi: 10.1016/j.marpol.2014.06.003

21. Pavlov A.V., Vasilyeva Zh.V. Investigation of sorbents of oil and oil product for the elimination of emergency oil spills in the seas of the Arctic region // Problems of Regional Ecology. 2019. No. 5. P. 89–94 (in Russian). doi: 10.24411/1728-323X-2019-17089

Получение безводного нитрата кальция и кристаллического сульфата аммония из отхода производства фосфорных удобрений

© 2026. А. В. Шиляев¹, к. т. н., гл. специалист по научной работе производственной лаборатории, И. Д. Трошкина², д. т. н., профессор,

¹Филиал «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Кирово-Чепецке, 613040, Россия, г. Кирово-Чепецк, пер. Пожарный, д. 7,

²Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, 125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, e-mail: Andrey.Shilyaev@uralchem.com

Производство экстракционной фосфорной кислоты и фосфорных минеральных удобрений приводит к образованию отходов, основным из которых является фосфогипс. Большая его часть размещается в отвалах на долгосрочное хранение. Фосфогипс можно рассматривать как потенциальный вторичный источник кальция, серы, фосфора и редкоземельных элементов цериевой группы. Описанные в литературе способы переработки фосфогипса не совершенны и не находят применения в промышленности из-за низкой стоимости основного продукта – сульфата кальция, а также высокой себестоимости выделяемых редкоземельных элементов (РЗЭ). Цель работы – разработка технологии получения безводного нитрата кальция, кристаллического сульфата аммония и концентрата РЗЭ из фосфогипса – отхода производства экстракционной фосфорной кислоты. Разработана принципиальная технологическая схема, позволяющая отделять концентрат РЗЭ от соединений кальция и серы, получая из последних продукты, цена которых в несколько раз выше стоимости основного вещества фосфогипса. С помощью предложенной технологии из фосфогипса получены кристаллический сульфат аммония, который можно использовать в качестве компонента минеральных удобрений, безводный нитрат кальция, отвечающий требованиям товарного продукта для сельского хозяйства и нефтедобычи, и концентрат РЗЭ.

Ключевые слова: фосфогипс, отход, производство фосфорной кислоты, сульфат аммония, безводный нитрат кальция, фосфомел, редкоземельные элементы, концентрат.

Calcium nitrate anhydrous and ammonium sulfate crystalline obtaining from phosphate fertilizers wastes

© 2026. A. V. Shilyaev¹ ORCID: 0009-0002-8291-4326, I. D. Troshkina² ORCID: 0000-0002-5523-0247

¹KCKK Branch of Uralchem JSC in Kirovo-Chepetsk, 7, Pozharny Side-St., Kirovo-Chepetsk, Russia, 613040,

²D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047, e-mail: Andrey.Shilyaev@uralchem.com

Extractive phosphoric acid and phosphoric mineral fertilizers processing forms wastes, phosphogypsum is the main. Phosphogypsum is not widely used due to its low radioactivity. Most of it is accumulated in dumps for long-term storage. Phosphogypsum can be considered as a potential source of calcium, sulfur, phosphorus and rare earths (REs) of the cerium group. The aim of the work is to develop a technology for obtaining calcium nitrate $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ anhydrous, ammonium sulfate $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ crystalline and REs' concentrate from phosphogypsum. We develop a basic process flow diagram that allows separating REs' concentrate from calcium and sulfur compounds. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ is a product of the reaction between phosphogypsum and an excess of ammonium carbonate solution. The resulting phosphochalk is separated from the $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ solution by filtration. The $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ solution is neutralized with sulfuric acid to pH 4–6, evaporated, and $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ crystallized. Phosphochalk is dissolved in excess nitric acid. The resulting acidic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution is cooled to -10°C to separate the $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ crystals. After the above separating the REs' concentrate is precipitated with ammonia. After washing with nitric acid at -10°C , the crystals are dissolved and neutralized with CaCO_3 to pH 4. The resulting chalk pulp is filtered, separating $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution from insoluble impurities of calcium phosphate and fluoride. The purified $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ solution is evaporated and granulated to obtain $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ anhydrous.

Keywords: phosphogypsum, waste, phosphoric acid processing, ammonium sulfate, calcium nitrate anhydrous, phosphochalk, rare earths, concentrate.

Мировое производство и потребление фосфорных удобрений увеличивается с ростом населения и необходимостью интенсификации производства сельскохозяйственной продукции. Базовые и интенсивные технологии, рассчитанные на высокую урожайность и качество получаемой сельхозпродукции, обуславливают применение высоких доз удобрений, в том числе фосфорных. Свыше 80 % апатитового концентрата, поставляемого АО «Апатит» на российские заводы минеральных удобрений, перерабатывается по сернокислотной технологии [1], что приводит к образованию отхода – фосфогипса, который складировать в отвалы на специально отведённых полигонах, занимающих большие площади. Так, по данным [2], площадь полигона Филиала «ВМУ» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Воскресенске составляет более 60 га.

Фосфогипс относится к малоопасным веществам (IV класс опасности). Наличие хранилищ фосфогипса меняет геохимическую обстановку в ландшафте [3]. По данным [4], это может проявляться в изменении физико-химических характеристик почвы и водных объектов, накоплении загрязняющих веществ, изменении водного и теплового режима территории. Выделяют основные загрязняющие элементы, которые накапливаются в окружающей среде вблизи отвалов фосфогипса: стронций, фтор, природные радионуклиды, тяжёлые и редкоземельные металлы [5, 6]. В зоне непосредственного влияния предприятий, перерабатывающих фосфорсодержащее сырьё, наблюдается увеличение валового содержания стронция, фтора, а также их подвижных водорастворимых форм, превышающих установленные значения ПДК для почв [7, 8].

Исследования по токсичности и биоаккумуляции редкоземельных элементов (РЗЭ) в окружающей среде в основном свидетельствуют о негативном воздействии на растения и живые организмы, однако данные о влиянии малых доз весьма противоречивы. Редкоземельные элементы входят в перечень веществ, воздействие которых может иметь экологически значимые последствия для функционирования экосистем [9]. В то же время РЗЭ находят применение в высокотехнологичных областях: производство цифровой и бытовой электроники, автомобилестроение, ветроэнергетика. Постоянно увеличивающийся спрос на них может привести к дефициту на рынке [10].

Увеличение отвалов фосфогипса в РФ, с учётом низкого уровня его утилизации

(2–4 %) и значительного объёма уже складированного отхода (~ 300 млн т на 2023 г.), создаёт необходимость поиска новых путей его использования как вторичного ресурса. В настоящее время общая масса промышленных отвалов фосфогипса в мире составляет 2 млрд т и ежегодно увеличивается на 150 млн т [11].

Продукты неполного разложения фосфатного сырья, а также тяжёлые элементы в составе фосфогипса, являются не только источником негативного воздействия на окружающую среду, но и одним из факторов, ограничивающих возможности его утилизации.

По данным [12], в составе апатитового концентрата содержание РЗЭ около 1 масс.%. При сернокислотной переработке основная часть РЗЭ (до 0,4–0,5 масс.%) переходит в фосфогипс в виде фосфатов ввиду малой их растворимости в экстракционной фосфорной кислоте.

Использование фосфогипса в качестве мелиоранта [13, 14] может привести к накоплению в почвах РЗЭ, стронция, фтора и радионуклидов. При внесении в почву фосфогипса в дозах от 1 до 5 т/га в течение 5 лет количество накопленных РЗЭ может составить до 100 кг/га или около 30 мг/кг почвы.

Из-за слабой радиоактивности большая часть фосфогипса размещается в отвалах на долгосрочное хранение. Такой способ хранения и увеличение отвалов оказывают неблагоприятные экологические последствия, но промышленных технологий переработки фосфогипса на текущий момент не существует. В то же время, фосфогипс можно рассматривать как потенциальный вторичный источник кальция, серы, фосфора и РЗЭ цериевой группы.

Цель работы – разработка технологии получения безводного нитрата кальция, кристаллического сульфата аммония и концентрата редкоземельных элементов из фосфогипса – отхода производства экстракционной фосфорной кислоты.

Объекты и методы исследования

В работе использовали фосфогипс – отход производства фосфорных удобрений в Филиале «ВМУ» АО «ОХК «УРАЛХИМ» в г. Воскресенске – следующего состава (в %): $\Sigma\text{Ca, Sr} - 21,2$; $\text{SO}_4^{2-} - 45,6$; $\text{P}_2\text{O}_5 - 1,4$; $\text{F}^- - 0,3$; $\Sigma\text{РЗЭ} - 0,4$; $\text{H}_2\text{O} - 21,6$.

При полугидратном способе переработки апатитового концентрата образуется фосфогипс полугидрат $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, который в процессе хранения в отвалах активно поглощает влагу и переходит в фосфогипс дигидрат

Таблица 1 / Table 1

Гранулометрический состав фосфогипса после измельчения
Phosphogypsum granulometric composition after grinding

Фракция, мкм / Fraction, μm	Содержание, масс. % / Content, wt. %
< 3	2,6
3–4	0,8
4–5	0,6
5–10	3,5
10–20	5,5
20–50	16,7
50–100	28,3
100–200	32,2
> 200	9,7

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, при этом формируются цементационные структурные связи [2].

Измельчение фосфогипса проводили в шаровой мельнице до среднего размера частиц 95 мкм. Гранулометрический состав измельчённого фосфогипса представлен в таблице 1.

В качестве реагентов для переработки фосфогипса использовали полупродукты, получаемые при производстве минеральных удобрений в Филиале КЧХК: раствор азотной кислоты 58 %, раствор карбоната аммония 33 % с содержанием свободного аммиака 3 %.

Содержание компонентов определяли химическими и физико-химическими методами: сумму соединений кальция и стронция (в пересчёте на кальций) – по МЗУ-112-2020 (ФР.1.31.2020.37126), сульфаты – по ГОСТ EN 15749-2013 Метод А, фосфаты (в пересчёте на P_2O_5) – по ГОСТ 20851.2-75, фтор – по ГОСТ 24596.7-2015, содержание суммы РЗЭ – спектрофотометрическим методом с Арсеназо III [15].

Размер частиц определяли с помощью лазерного анализатора Analysette 22 Comfort (Fritsch) с диспергированием анализируемых частиц в жидкости по ГОСТ Р 8.777-2011.

Мутность растворов нитрата кальция определяли нефелометрическим методом на приборе турбидиметр НАСН 2100 АН по МЗУ-2-2016 (ФР.1.31.2018.29933).

Эксперименты проводили в двукратной повторности. Статистическую обработку результатов количественного химического анализа проводили по методу наименьших квадратов в соответствии с требованиями РМГ-54-2002.

Результаты и обсуждение

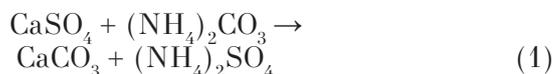
Существует ряд описанных в литературе и запатентованных технологий переработки

фосфогипса с извлечением солей редкоземельных металлов [16–18]. Описанные способы переработки фосфогипса имеют недостатки и не находят применения в промышленности из-за низкой стоимости основного продукта – сульфата кальция, производство которого создаёт основную экономическую составляющую, а также высокой себестоимости получаемых при этом РЗЭ.

Разработана принципиальная технологическая схема, позволяющая отделять концентрат РЗЭ от соединений кальция и серы, получая из последних соединения, цена которых в несколько раз выше стоимости основного вещества фосфогипса: безводный нитрат кальция, кристаллический сульфат аммония. Оба эти соединения находят применение в промышленности и сельском хозяйстве. Нитрат кальция является ценным физиологически щелочным удобрением и компонентом буровых растворов нефтедобычи, а сульфат аммония – компонентом минеральных удобрений, содержащим два питательных элемента (азот и серу).

Предлагаемая схема переработки фосфогипса (рис. 1) предусматривает конверсию исходного сырья с получением раствора сульфата аммония и фосфомела, последующую переработку получаемого мела в нитрат кальция с получением безводного $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и концентрата РЗЭ. Из раствора сульфата аммония предполагается получение кристаллического сульфата аммония для использования в качестве компонента минеральных удобрений.

Конверсию фосфогипса проводили раствором карбоната аммония с получением раствора сульфата аммония и карбоната кальция (1):



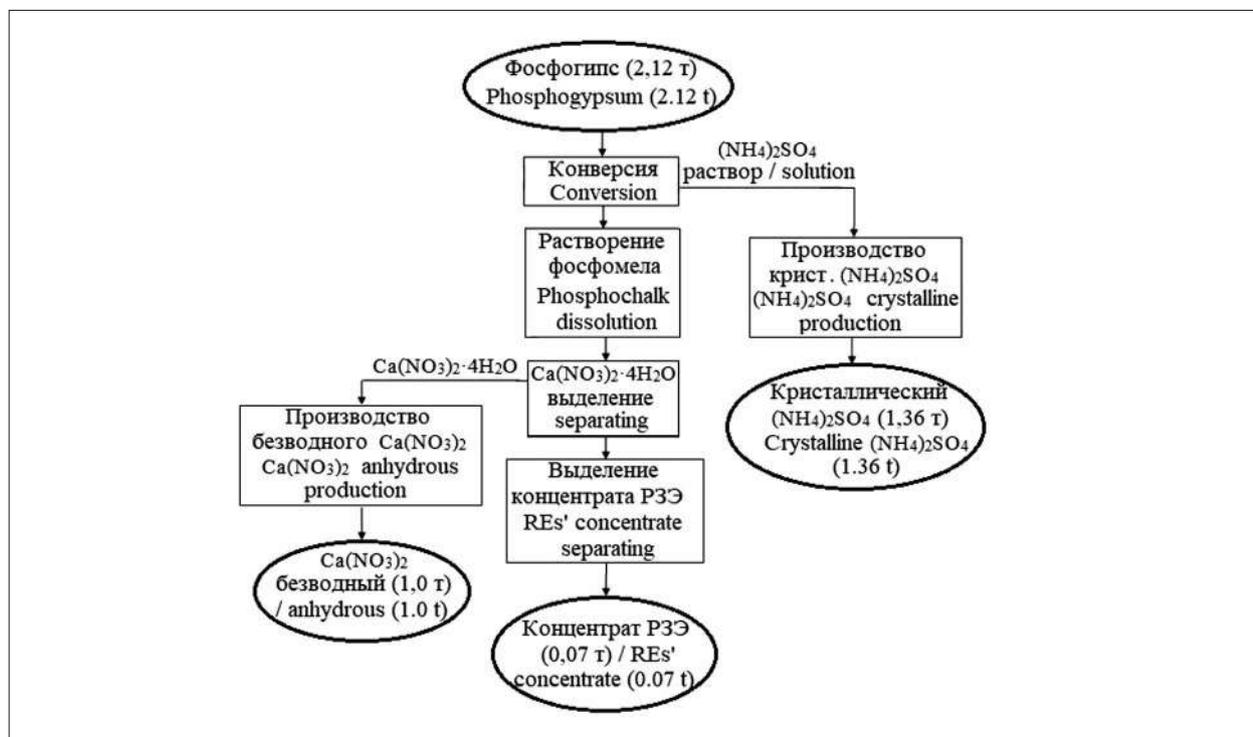


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема получения безводного нитрата кальция, кристаллического сульфата аммония и концентрата редкоземельных элементов из фосфогипса
Fig. 1. Basic process flow diagram for obtaining calcium nitrate anhydrous, ammonium sulfate crystalline, and rare earths' concentrate from phosphogypsum

Таблица 2 / Table 2

Химический состав промытого фосфомела и раствора сульфата аммония
 Chemical composition of washed phosphochalk* and ammonium sulfate solution

Промытый фосфомел (в пересчёте на сухое вещество) / Washed phosphochalk (in terms of dry matter)		Раствор сульфата аммония Ammonium sulfate solution	
Компонент / Component	масс.% / wt.%	Компонент / Component	масс.% / wt.%
CaCO ₃	85,5	(NH ₄) ₂ SO ₄	28,5
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,8	(NH ₄) ₂ CO ₃	5
CaSO ₄	5,2	NH ₃	0,3
CaF ₂	0,8	F ⁻	< 0,03
(NH ₄) ₂ SO ₄	1,4	P ₂ O ₅	< 0,03
ΣРЗЭ (в пересчёте на La) ΣRE (in terms of La)	0,5	ΣРЗЭ (в пересчёте на La) ΣRE (in terms of La)	< 0,01
Нерастворимый в азотной кислоте остаток / Residue insoluble in nitric acid	5	pH	8,5

Note: * – technical-grade calcium carbonate; RE – rare earths.

Навеску фосфогипса дозировали в раствор карбоната аммония, после чего выдерживали при перемешивании в течение заданного промежутка времени (2–6 ч) при температуре 25–60 °С. Расход раствора карбоната аммония составлял от 100 до 130 % от стехиометрического значения на кальций в исходном сырье. Далее полученную пульпу фильтровали под вакуумом (0,5 атм.), в качестве фильтро-

ткани использовали полипропилен. Осадок (влажный фосфомел) промывали водой в соотношении 1 : 2. Фильтрат (раствор сульфата аммония), осадок и промывную воду анализировали на содержание основных компонентов.

Характеристика и химический состав получаемых продуктов приведены в таблице 2. Из данных видно, что в процессе конверсии фосфогипса раствором карбоната аммония

в фосфомел РЗЭ не переходят в карбонатный раствор ввиду их малой растворимости [19] и концентрируются в фосфомеле. Содержание РЗЭ в фосфомеле со степенью конверсии не менее 95 % составило 0,5 масс.%. Содержание РЗЭ в растворе сульфата аммония – менее 0,01 масс.%.
 Образующийся в результате конверсии раствор сульфата аммония может быть использован для получения кристаллического сульфата аммония, который предварительно необходимо подкислить серной кислотой до рН 4–6 для перевода избытка карбоната аммония и свободного аммиака в сульфат. Далее раствор сульфата аммония упаривают при температуре кипения (115 °С), внося свежие порции подкисленного фильтрата, до получения суспензии с содержанием кристаллов масс.%. Кристаллы сульфата аммония фильтруют под вакуумом (0,5 атм.). В качестве фильтрующего материала можно использовать полипропиленовые фильтроткани, отличающиеся высокой химической устойчивостью. Кристаллы сушат при температуре 105 °С. Содержание компонентов в сухих кристаллах составит, масс. %: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 99,7; P_2O_5 – 0,1; F^- – 0,01.

Средний размер кристаллов по данным лазерного анализа составил 466 мкм, содержание фракции размером более 0,5 мм 56 масс.%

(рис. 2). Товарный продукт, в соответствии с требованиями ГОСТ 9097-82, должен содержать не менее 80 масс.% фракции размером более 0,5 мм, поэтому после дополнительной классификации полученный кристаллический сульфат аммония может быть использован как компонент сложных минеральных удобрений в качестве источника легкодоступной серы.

Для получения безводного нитрата кальция и концентрата РЗЭ фосфомел растворили в азотной кислоте, избыток которой увеличивает степень выделения тетрагидрата нитрата кальция. Полученную пульпу, содержащую избыток азотной кислоты, нитрат кальция, нитраты редкоземельных металлов, сульфат кальция и нерастворимый в кислоте остаток соединений кремния отфильтровали. Из фильтрата, содержащего (масс.%): Са – 10,6; P_2O_5 – 0,42; HNO_3^- – 10; F^- – 0,015; РЗЭ – 0,2, выделили тетрагидрат нитрата кальция кристаллизацией при температуре –10 °С, далее кристаллы отфильтровали на вакуум-фильтре и промыли охлаждённой до –10 °С азотной кислотой. Из фильтрата, полученного после отделения четырёхводного нитрата кальция, осаждали концентрат РЗЭ водным раствором аммиака. Содержание Σ РЗЭ в концентрате составило 16 масс.%.
 Согласно принципиальной технологической схеме, представленной на рисунке 1, без-

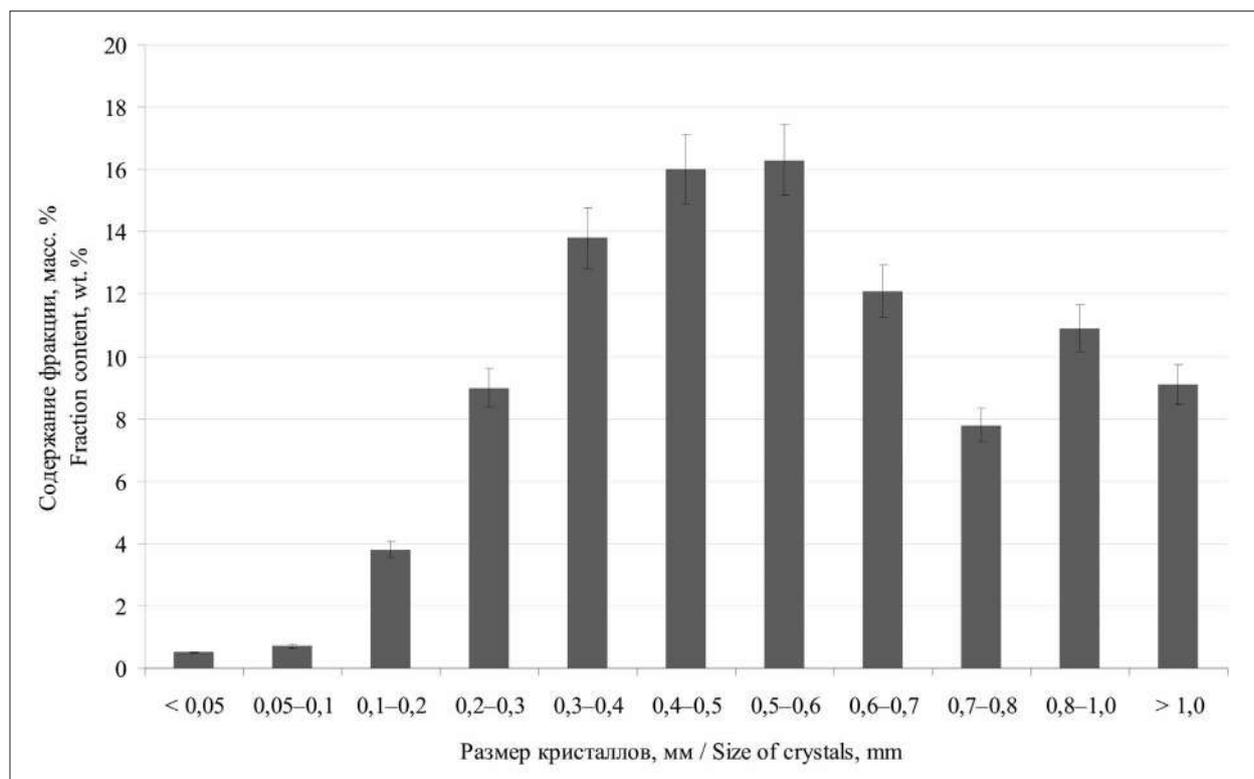


Рис. 2. Размер кристаллов сульфата аммония, мм / Fig. 2. Size of ammonium sulfate crystal, mm

Литература

водный нитрат кальция получали из промытых азотной кислотой кристаллов тетрагидрата нитрата кальция $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, содержащих 10–12 % свободной азотной кислоты за счёт захваченной жидкой фазы.

Получение безводного нитрата кальция проводили в полунепрерывном режиме. При температуре 55–60 °С захваченную кристаллами азотную кислоту нейтрализовали избытком конверсионного мела до pH 4, при котором примеси фосфатов и фторидов осаждаются в виде солей кальция. Полученную пульпу с избытком мела дополнительно нейтрализовали водным раствором аммиака до pH 5, затем вводили воду в количестве, обеспечивающем получение после фильтрации 45–50 % раствора нитрата кальция. Меловую пульпу нитрата кальция фильтровали на лабораторном фильтр-прессе под давлением 5 атм., в качестве фильтровальной ткани использовали ткань «Nordfelt» (г. Санкт-Петербург, арт. WMA008C1). После фильтрации раствор нитрата кальция упаривали и сушили в сушильном шкафу при температуре 180 °С до получения безводного нитрата кальция.

Характеристика и состав получаемого безводного нитрата кальция из промежуточных продуктов переработки фосфогипса соответствуют требованиям товарного нитрата кальция: массовая доля $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – не менее 96 %, массовая доля воды – не более 3 %, массовая доля нерастворимого остатка – не более 0,1 %, мутность 50 % раствора нитрата кальция – не более 20 NTU [20].

Разработанный способ переработки фосфогипса с получением концентрата РЗЭ, безводного нитрата кальция и кристаллического сульфата аммония из отходов производства экстракционной фосфорной кислоты запатентован [21].

Заключение

Разработан и запатентован способ переработки фосфогипса – отхода производства фосфорных удобрений. Показана возможность использования фосфогипса в качестве вторичного сырья для получения соединений кальция, серы и концентрата редкоземельных элементов. Из фосфогипса получены кристаллический сульфат аммония, который можно использовать в качестве компонента минеральных удобрений, безводный нитрат кальция, отвечающий требованиям товарного продукта для сельского хозяйства и нефтедобычи, и концентрат редкоземельных элементов.

1. Локшин Э.П., Тареева О.А. Разработка технологий извлечения редкоземельных элементов при сернокислотной переработке Хибинского апатитового концентрата на минеральные удобрения / под ред. П.Б. Громова. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 268 с.

2. Кравченко П.А., Куликова О.А., Волгарева Е.А., Костылев А.А., Лещенко М.И. Перспективы исследований фосфогипса как материала для строительства // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. 2024. Т. 21. № 1. С. 7–21. doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21

3. Papaslioti E.M., Pérez-López R., Parviainen A., Macías F., Delgado-Huertas A., Garrido C.J., Marchesi C., Nieto J.M. Stable isotope insights into the weathering processes of a phosphogypsum disposal area // Water Res. 2018. V. 140. P. 344–353. doi: 10.1016/j.watres.2018.04.060

4. Pérez-López R., Macías F., Cánovas C.R., Sarmiento A.M., Pérez-Moreno S.M. Pollutant flows from a phosphogypsum disposal area to an estuarine environment: An insight from geochemical signatures // Sci. Total Environ. 2016. V. 553. P. 42–51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.070

5. Мельникова А.Д., Хомяков Д.М. Загрязнение почвенного покрова в импактной зоне предприятий по производству комплексных минеральных удобрений // Экологически безопасное развитие сельских территорий и сохранение водных объектов: сб. науч. трудов междунар. семинаров, проведенных в рамках Российско-Финляндского проекта SE717 в 2013–2015 гг. СПб.: ИАЭП, 2016. С. 73–75.

6. Kamel N.H.M. Natural radioactivity and radiation protection in use of phosphogypsum waste product samples // Radiochemistry. 2012. V. 54. P. 92–97. doi: 10.1134/S1066362212010146

7. Петренко Д.В., Белюченко И.С. Влияние отходов Белореченского химзавода на содержание стронция в окружающих ландшафтах // Экологический вестник Северного Кавказа. 2012. Т. 8. № 1. С. 4–79.

8. Yakovlev A.S., Kaniskina M.A., Terekhova V.A. Ecological evaluation of artificial soils treated with phosphogypsum // Eurasian Soil Sc. 2013. V. 46. P. 697–703. doi: 10.1134/S1064229313060124

9. Олькова А.С., Сысолятина М.А. Источники, токсичность и биоаккумуляция редкоземельных элементов в окружающей среде: обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 1. С. 19–30. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-019-030

10. Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В. Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 68–84. doi: 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84

11. Лычева М.А. Особенности инженерно-геологических условий формирования отвалов фосфогипса // Научный вестник Московского Государственного Горного Университета. 2011. № 3. С. 53–58.

12. Маслобоев В.А., Лебедев В.Н. Редкоземельное сырьё Кольского полуострова и проблемы его комплексной переработки. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1991. 151 с.

13. Добрыдnev Е.Н., Локтионов М.Ю. Основные результаты исследования агроэкологической эффективности фосфогипса в земледелии Краснодарского края // Плодородие. 2013. № 1. С. 7–9.

14. Аканова Н.И. Фосфогипс нейтрализованный – перспективное агрохимическое средство интенсификации земледелия (по материалам семинаров ОАО «МХК» ЕвроХим) // Плодородие. 2013. № 1. С. 2–6.

15. Аналитическая химия редкоземельных элементов и иттрия / под ред. И.В. Тананаева. М.: Наука, 1966. 186 с.

16. Локшин Э.П., Тарева О.А., Калинин В.Т. Способ переработки фосфогипса // Патент РФ 2487083 С1. Заявление: 2012115129/05, 16.04.2012. Дата публикации: 10.07.2013. Бюлл. 19.

17. Колокольников В.А., Титов В.М., Шатов А.А. Способ комплексной переработки фосфогипса // Патент РФ 2258036 С1. Заявление: 2004117641/15, 09.06.2004. Дата публикации: 10.08.2005. Бюлл. 22.

18. Успехи в химии и технологии редкоземельных элементов / под ред. Л. Айринга. М.: Металлургия, 1970. 360 с.

19. Нитрат кальция безводный [Электронный ресурс] <https://tech.uralchem.ru/catalog/special/nitrat-kaltsiya-bezvodnyy/> (Дата обращения: 27.10.2025).

20. Медянцева Д.Г., Шилиев А.В., Фокина М.Л. Способ извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса // Патент РФ 2739409 С1. Заявление: 2020111605, 19.03.2020. Дата публикации: 23.12.2020. Бюлл. 36.

References

1. Lokshin E.P., Tareeva O.A. Technologies development for the extraction of rare earth elements while sulfuric acid processing of Khibiny apatite concentrate for mineral fertilizers production / Ed. P.B. Gromov. Apatity: KSC RAS, 2015. 268 p. (in Russian).

2. Kravchenko P.A., Kulikova O.A., Volgareva E.A., Kostylev A.A., Leshchenko M.I. Prospects for research of phosphogypsum as a material for construction // Proceedings of Petersburg Transport University. 2024. V. 21. No. 1. P. 7–21 (in Russian). doi: 10.20295/1815-588X-2024-01-7-21

3. Papaslioti E.M., Pérez-López R., Parviainen A., Macías F., Delgado-Huertas A., Garrido C.J., Marchesi C., Nieto J.M. Stable isotope insights into the weathering processes of a phosphogypsum disposal area // Water Res. 2018. V. 140. P. 344–353. doi: 10.1016/j.watres.2018.04.060

4. Pérez-López R., Macías F., Cánovas C.R., Sarmiento A.M., Pérez-Moreno S.M. Pollutant flows from a phosphogypsum disposal area to an estuarine environment: An insight from geochemical signatures // Sci. Total Environ. 2016. V. 553. P. 42–51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.070

5. Melnikova A.D., Khomyakov D.M. Soil cover pollution in the impact zone of complex mineral fertilizer production enterprises // Environmentally safe development of rural areas and preservation of water bodies: sbornik nauchnykh trudov mezhdunarodnykh seminarov, proveden-

nykh v ramkakh Rossiysko-Finlyandskogo proekta SE717. St. Petersburg: IAEP, 2016. P. 73–75 (in Russian).

6. Kamel N.H.M. Natural radioactivity and radiation protection in use of phosphogypsum waste product samples // Radiochemistry. 2012. V. 54. P. 92–97. doi: 10.1134/S1066362212010146

7. Petrenko D.V., Belyuchenko I.S. How wastes from chemical factory in Belorechensk affect strontium content in the surrounding landscapes // The North Caucasus Ecological Herald. 2012. V. 8. No. 1. P. 4–79 (in Russian).

8. Yakovlev A.S., Kaniskin M.A., Terekhova V.A. Ecological evaluation of artificial soils treated with phosphogypsum // Eurasian Soil Sc. 2013. V. 46. P. 697–703. doi: 10.1134/S1064229313060124

9. Olkova A.S., Sysolyatina M.A. Sources, toxicity and bioaccumulation of rare earths in the environment: review // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 1. P. 19–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-019-030

10. Kryukov V.A., Yatsenko V.A., Kryukov Ya.V. Rare earth industry – how to take advantage of opportunities // Russian Mining Industry. 2020. No. 5. P. 68–84 (in Russian). doi: 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84

11. Lycheva M.A. Features of geotechnical conditions of the phosphogypsum dumps' forming // Nauchnyy vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta. 2011. No. 3. P. 53–58 (in Russian).

12. Masloboev V.A., Lebedev V.N. Rare earth raw materials of the Kola Peninsula and problems of its complex processing. Apatity: KNTs AN SSSR, 1991. 151 p. (in Russian).

13. Dobrydnev E.N., Loktionov M.Yu. Main results of studying the agroecological efficiency of phosphogypsum in the agriculture of Krasnodar Krai // Plodorodie. 2013. No. 1. P. 7–9 (in Russian).

14. Akanova N.I. Neutralized phosphogypsum, a promising agrochemical for farming intensification (from materials of EuroChem seminars) // Plodorodie. 2013. No. 1. P. 2–6 (in Russian).

15. Analytical chemistry of rare earth elements and yttrium / Ed. I.V. Tananaev. Moskva: Nauka, 1966. 186 p. (in Russian).

16. Lokshin E.P., Tareeva O.A., Kalinnikov V.T. Method of processing phosphogypsum // Patent RU 2487083 C1. Application: 2012115129/05, 16.04.2012. Date of publication: 10.07.2013. Bull. 19 (in Russian).

17. Kolokolnikov V.A., Titov V.M., Shatov A.A. Phosphogypsum integrated processing method // Patent RU 2258036 C1. Application: 2004117641/15, 09.06.2004. Date of publication: 10.08.2005. Bull. 22 (in Russian).

18. Progress in the science and technology of the rare earths / Ed. L. Eyring. Moskva: Metallurgiya, 1970. 360 p. (in Russian).

19. Calcium nitrate anhydrous [Internet resource] <https://tech.uralchem.ru/catalog/special/nitrat-kaltsiya-bezvodnyy/> (Accessed: 27.10.2025).

20. Medyantseva D.G., Shilyaev A.V., Fokina M.L. Method of extracting rare-earth elements from phosphogypsum // Patent RU 2739409 C1. Application: 2020111605, 19.03.2020. Date of publication: 23.12.2020. Bull. 36 (in Russian).

Распространение солеустойчивой растительности в поймах при техногенном засолении почв

© 2026. О. З. Еремченко, д. б. н., профессор,
Е. Е. Малышкина, м. н. с., И. В. Пахоруков, ассистент,
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, д. 15,
e-mail: eremch@psu.ru, malyshkinaeliz@gmail.com, Ivan-psu@yandex.ru

На основе маршрутных исследований было показано, что в составе изреженной растительности пойм двух малых рек (Чёрная и Лёнва), расположенных в зонах воздействия отходов калийного производства (Пермский край), доминировали рудеральные однолетние и многолетние травянистые виды, присутствовали факультативные и облигатные (*Spergularia salina* J. et C. Presl, *Triglochin maritimum* L.) галофиты. На двух участках с солеустойчивой растительностью изучили почвенно-экологические условия произрастания. Почвенные пробы отбирали летом 2022 г. в четыре периода наблюдений в десятикратной повторности. В полевых условиях измеряли pH и Eh корнеобитаемого слоя почвы (0–10 см); в почвенных пастах при влажности 50 % определяли активность Na⁺, K⁺, Cl⁻. В пойме р. Чёрной поверхностный слой почвы характеризовался нейтральной и слабощелочной реакцией среды (pH 7,3–8,4) и слабо восстановительными условиями (Eh 139–282 мВ), засоление отсутствовало (по уровню активности Na⁺). В верхнем слое почвы поймы р. Лёнвы отмечалась значительная вариабельность pH (от 5,4 до 6,9); Eh колебалась от восстановительных (–135 мВ) до окислительных значений (468 мВ). В почве проявлялось засоление разной степени (от слабой до сильной), в ряде случаев засоление отсутствовало. Активность K⁺ в почве достигала уровня активности Na⁺, активность Cl⁻ превышала суммарную активность засоряющих катионов. Изреженную растительность пойм оконтуривали с использованием летних спутниковых снимков в комбинации «Естественные цвета». За период с 2015 по 2021 г. площадь, занятая солеустойчивой растительностью, в пойме р. Чёрной увеличилась в 1,8 раза и составила 8,7 га, а в пойме р. Лёнвы – в 1,6 раза и достигла 22,2 га.

Ключевые слова: синантропизация, калийная промышленность, солеустойчивая растительность, техногенное засоление, спутниковое картографирование.

Salt-tolerant plant distribution within floodplain ecosystems due to technogenic soil salinization

© 2026. O. Z. Eremchenko ORCID: 0000-0003-3581-0874
E. E. Malyshkina ORCID: 0000-0002-7251-7637 I. V. Pakhorukov ORCID: 0000-0001-8152-0283
Perm State National Research University,
15, Bukirev St., Perm, Russia, 614990,
e-mail: eremch@psu.ru, malyshkinaeliz@gmail.com, Ivan-psu@yandex.ru

According to site research, the vegetation that grows in the floodplain ecosystems of the Chyornaya and Lyonva rivers, located in areas affected by potash production waste, is dominated by ruderal annual and perennial herbaceous species. Additionally, obligate (*Spergularia salina* J. et C. Presl, *Triglochin maritimum* L.) and facultative halophytes were found. The pedological and ecological factors affecting the growth were analyzed in two distinct areas with salt-tolerant vegetation. The samples were collected ten times during the summer 2022 across four distinct observational intervals. The pH levels and redox potential within the root zone (0–10 cm) were field-measured. Na⁺, K⁺, and Cl⁻ content were determined in soil at humidity of 50 %. In the Chernaya River floodplain, the topsoil exhibited a neutral to slightly alkaline pH (7.3–8.4) and weakly reducing conditions (139–282 mV). Salinization was notably absent, as indicated by the measured levels of Na⁺ activity. In the topsoil of the Lyonva River floodplain, the pH levels varied from 5.4 to 6.9. Moreover Eh varied from reducing (as low as –135 mV) to oxidizing values (468 mV). The soil exhibited both varying degrees of salinization (from mild to severe) as well as its absence. The K⁺ activity in the soil reached that of Na⁺, while the Cl⁻ activity exceeded the total activity of the salinizing cations. Through the use of true color satellite imagery obtained during the summer months, it was possible to identify the sparse flora distribution within the floodplain ecosystems. Between 2015 and 2021, the expanse of salt-tolerant vegetation within the Chyornaya River floodplain grew by 1.8 times, totaling 8.7 hectares, and in the Lyonva River floodplain it increased by 1.6 times, reaching 22.2 hectares.

Keywords: synanthropization, potash industry, salt-tolerant plants, technogenic secondary salinization, satellite-based mapping.

Синантропизация растительности – это процесс замещения эндемичных компонентов сообществ космополитными видами растений, рассматривается как нежелательное следствие «коадаптации» природы к условиям антропогенно изменённой среды [1–3]. Частным случаем синантропизации растительности является появление чужеродных галофитов в местах техногенного засоления почв. Расселение солеустойчивых видов растений характерно для промышленных территорий, связанных с развитием содовой, калийной и соляной промышленности [4–10].

В Пермском Прикамье в зонах складирования солевых отходов калийного производства образовались солончаковые почвы и вторичные солончаки [11, 12]. В техногенно засоленных ландшафтах в составе растительности встречались рудеральные виды, факультативные галофиты (бескильница расставленная *Puccinellia distans* (Jacq.) Parl., некоторые виды маревых (*Chenopodioideae*)) и истинные галофиты (торичник солончаковый *Spergularia salina* J. et C. Presl, триостренник приморский *Triglochin maritimum* L., сведа заострённая *Suaeda acuminata* (С.А. Mey.) Moq. и др.) [9]. В настоящее время отсутствует информация о состоянии почв в местах формирования новых солеустойчивых сообществ, не установлены масштабы и тенденции распространения солеустойчивой растительности в долинах малых рек.

Целью наших исследований являлось изучение состава солеустойчивой растительности, условий и масштабов её распространения в поймах малых рек Прикамья в связи с хранением отходов калийного производства.

Объекты и методы исследования

Территории исследований расположены в Березниковском городском округе Пермского края в поймах малых рек Чёрной и Лёнвы. На основе маршрутных исследований были выбраны два участка, растительность которых характеризовалась пониженным проективным покрытием, присутствием галофитов и солеустойчивых растений.

Исследуемый участок в пойме р. Чёрной находится под влиянием подземных минерализованных вод, формирующихся у солеотвала Березниковского калийного производственного рудоуправления № 3 (БКПРУ-3). Координаты участка – 59°16'32.5" с. ш., 56°48'59.1" в. д. (в системе координат WGS-84). В пойме р. Лёнвы исследуемый участок

расположен в зоне воздействия шламохранилища БКПРУ-3. Координаты участка исследований – 59°19'17.30" с. ш., 56°50'25.94" в. д.

В летний период 2022 г. на исследуемых участках измеряли рН и окислительно-восстановительный потенциал (Еh) почвы на глубине 0–10 см потенциометрическим методом с помощью портативного рН метра HI-9025 (Hanna Instruments, Германия), оборудованного электродами HI 3230, HI 1230 и термокомпенсатором. Наблюдения проводили в 4 срока в десятикратной повторности.

Из сухих образцов почвы готовили пасты с влажностью около 50% путём добавления дистиллированной воды. В пастах определяли активности ионов Na^+ , K^+ , Cl^- (a_{Na} , a_{K} , a_{Cl}) с помощью ионоселективных электродов серии ЭЛИС 121К, 112Na, 131Cl на иономере Экотест-120. Значение рХ преобразовывали в активность иона с размерностью ммоль/л.

Для визуального дешифрирования контуров изреженной солеустойчивой растительности на техногенно засоленных аллювиальных почвах использовали летние космоснимки в комбинации спектральных каналов «естественные цвета» [13, 14].

Для проведения расчётов, построения графиков и диаграмм были использованы программы PAST 4.03.

Результаты и обсуждение

Свойства засоленных аллювиальных почв. На участке поймы р. Чёрной в корнеобитаемом слое аллювиальной почвы реакция среды находилась преимущественно в пределах слабощелочных значений (рис. 1). Засоленные почвы при нейтральном составе солей (хлориды и сульфаты), как правило, имели слабощелочную или нейтральную реакцию среды [15]. Аллювиальные почвы таёжно-лесной зоны характеризуются кислой реакцией среды [16]. Нейтрализация природной кислотности аллювиальных почв и появление щёлочности непосредственно связаны с развитием техногенного засоления, в минерализованных водах среди катионов преобладает щелочной металл – натрий [11].

Почва на участке в пойме р. Чёрной отличалась относительно невысокой изменчивостью окислительно-восстановительных условий, Еh находился в пределах 200–300 мВ (рис. 1); при таком значении Еh почва характеризуется слабо восстановительной обстановкой [17, 18].

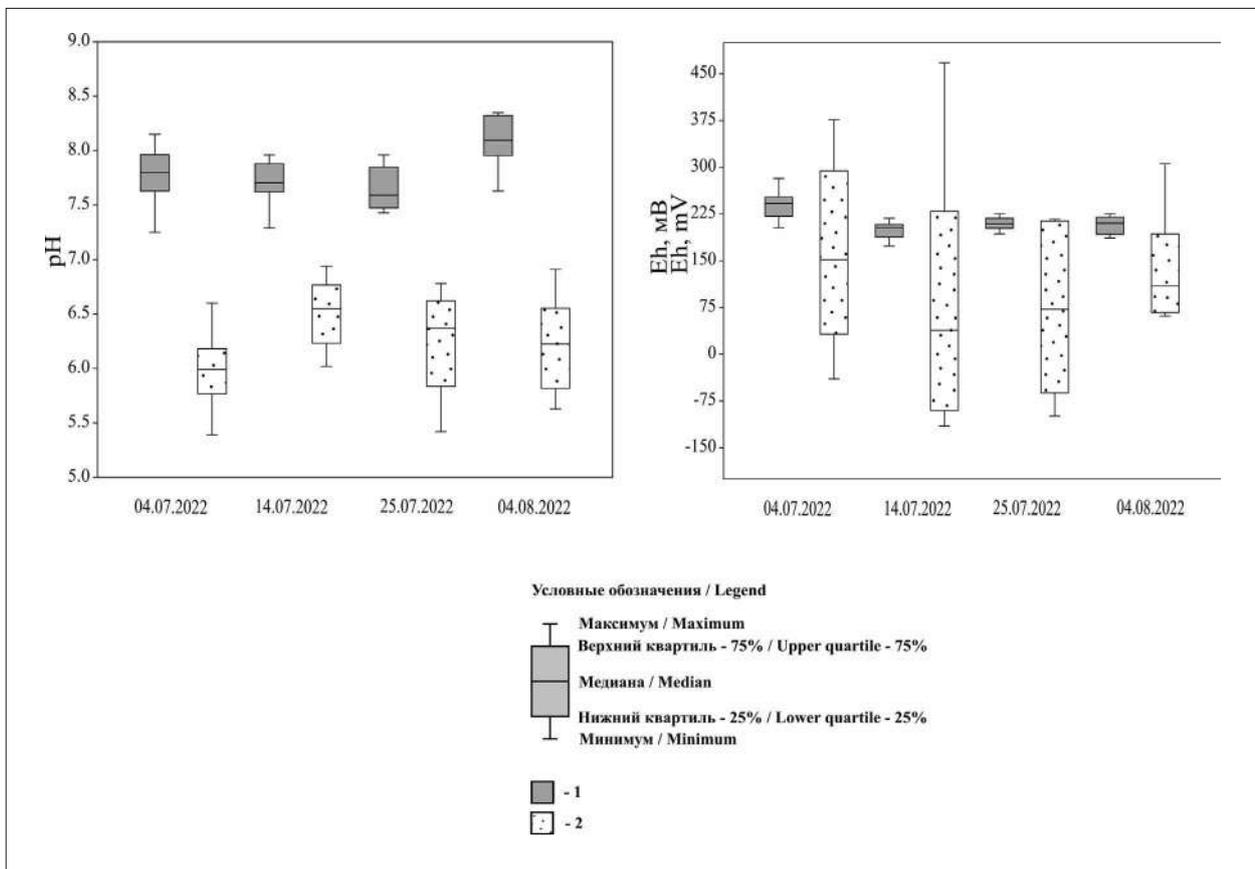


Рис. 1. Динамика актуальной реакции почвенной среды (pH_{H_2O}) и окислительно-восстановительного потенциала (Eh) в аллювиальных техногенно засоленных почвах.

Примечание к рисункам 1 и 2: 1 – пойма р. Чёрной, 2 – пойма р. Лёнвы

Fig. 1. The dynamics of the pertinent reaction of the soil (pH_{H_2O}) and redox conditions (Eh) in alluvial technogenically saline soils.

Note to Figures 1 and 2: 1 – in the Chyornaya River floodplain, 2 – in the Lyonva River floodplain

В корнеобитаемом слое почвы в пойме р. Лёнвы наблюдали колебания значений pH от нейтральных до сильнокислых (рис. 1). На этом исследуемом участке в верхнем слое почвы установили весьма контрастные окислительно-восстановительные условия (рис. 1), что обусловлено микрорельефом и разным уровнем залегания грунтовых вод. На относительно повышенных элементах рельефа наблюдали окислительную обстановку ($Eh > 400$ мВ); известно, что Eh более +400–450 мВ характерны для хорошо аэрированных почв [17, 18]. Значения Eh менее 200 мВ характеризуют выраженный восстановительный режим и переувлажнение почвы [18]. Восстановительная среда с Eh менее 100 мВ предполагает развитие процессов восстановления железа и серы с образованием сульфидов железа [19]. Окисление сульфидов в аэрированных слоях почвы сопровождается образованием серной кислоты и появлением сильнокислой реакции среды [20]. Возможно, сравнительно низкие значения pH в корнеобитаемом слое почвы из

поймы р. Лёнвы обусловлены сульфидогенезом и последующим окислением сульфидов [21].

Для определения степени засоления почв используют показатели активности Na^+ в почвенных пастах: градация $a_{Na} < 20$ ммоль/л соответствует незасоленным почвам, $a_{Na} = 20–50$ ммоль/л – слабозасоленным, $a_{Na} = 50–150$ ммоль/л – средnezасоленными, $a_{Na} = 150–300$ ммоль/л – сильнозасоленным, $a_{Na} > 300$ ммоль/л – очень сильно засоленным почвам [22].

Корнеобитаемый слой почвы в пойме р. Чёрной отличался относительно пониженной a_{Na} , по этому показателю почва характеризовалась как незасоленная, реже – слабозасоленная (рис. 2). В почве поймы р. Лёнвы a_{Na} варьировала в очень широком интервале, особенно в конце лета. Верхний слой почвы характеризовался разной степенью засоления (от слабой до сильной); встречались и незасоленные почвы.

Калий присутствует в отходах калийной промышленности, минерализованных водах

и техногенно засоленных почвах [11]. Активность K^+ в верхнем слое аллювиальных почв была заметно меньше a_{Na} (рис. 2). В почве поймы р. Чёрной a_K была, как правило, ниже 10 ммоль/л. В почве поймы р. Лёнвы a_K очень сильно варьировала и в некоторых частях исследуемого участка достигала 20–50 ммоль/л. При равной a_{Na} почва считается слабозасоленной, следовательно, показатели a_K позволяют утверждать, что аллювиальная почва подвержена калий-натриевому засолению.

Активность Cl^- в почве поймы р. Чёрной заметно превышала суммарную активность Na^+ и K^+ . По данным работы [11], в техногенно засоленных аллювиальных почвах наряду с хлоридами натрия и калия присутствовали хлориды кальция и магния. Высокая a_{Cl} может быть обусловлена и тем, что анионы слабо поглощаются почвами умеренных широт. Наибольшая a_{Cl} отмечена в почве из поймы р. Лёнвы, во второй половине лета она достигала нескольких сотен ммоль/л. Известно, что

избыток ионов натрия и хлоридов в почвах вызывает у растений солевой и осмотический стрессы [23–25]; почвы становятся токсичными для большинства видов растений, кроме истинных и факультативных галофитов [26].

Состав растительности. В пределах исследуемых участков растительный покров был изреженным; проективное покрытие варьировало от 60–70 до 10–15 %. Растительность представлена травянистыми однолетними и многолетними видами (табл.).

На исследуемых участках присутствовали два облигатных галофита – *S. salina*, *T. maritimum*. Торичник солончаковый является космополитом, расселению которого способствуют крылатые семена [27]; триостренный приморский ранее обнаружен на территории Соликамского калийного производственного рудоуправления [28]. Рудеральные виды (*P. distans*, *L. tatarica*, *C. glaucum*, *A. prostrata*) произрастают на засоленных почвах и, по-видимому, являются факультативными гало-

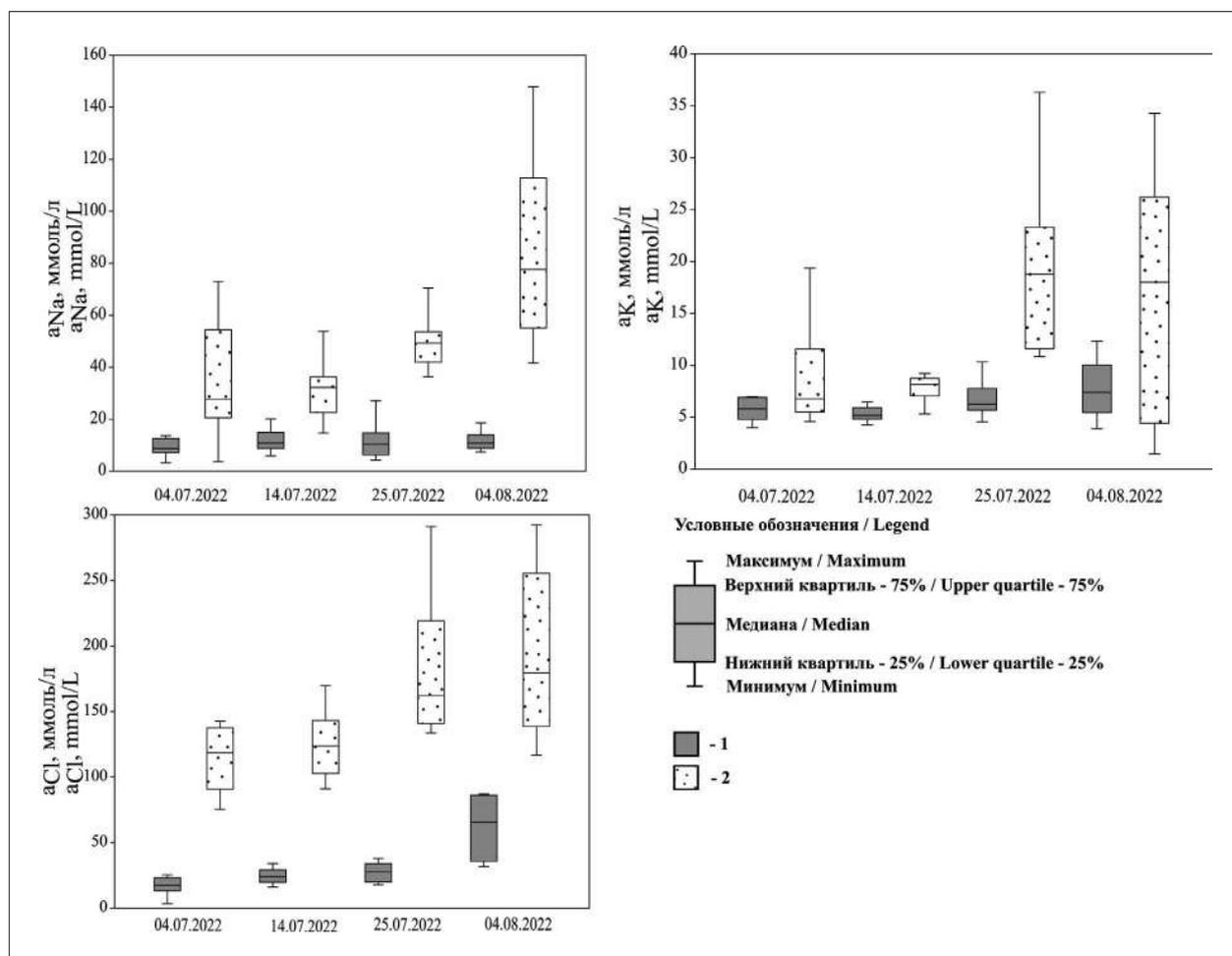


Рис. 2. Динамика активности ионов Na^+ , K^+ , Cl^- в аллювиальных техногенно засоленных почвах, ммоль/л
 Fig.2. The dynamics of sodium-, potassium-, and chloride-ion activity in alluvial soils with technogenic salinity, mmol/L

О. З. Еремченко, Е. Е. Малышкина, И. В. Пахоруков
«Распространение солеустойчивой растительности
в поймах при техногенном засолении почв». С. 161.

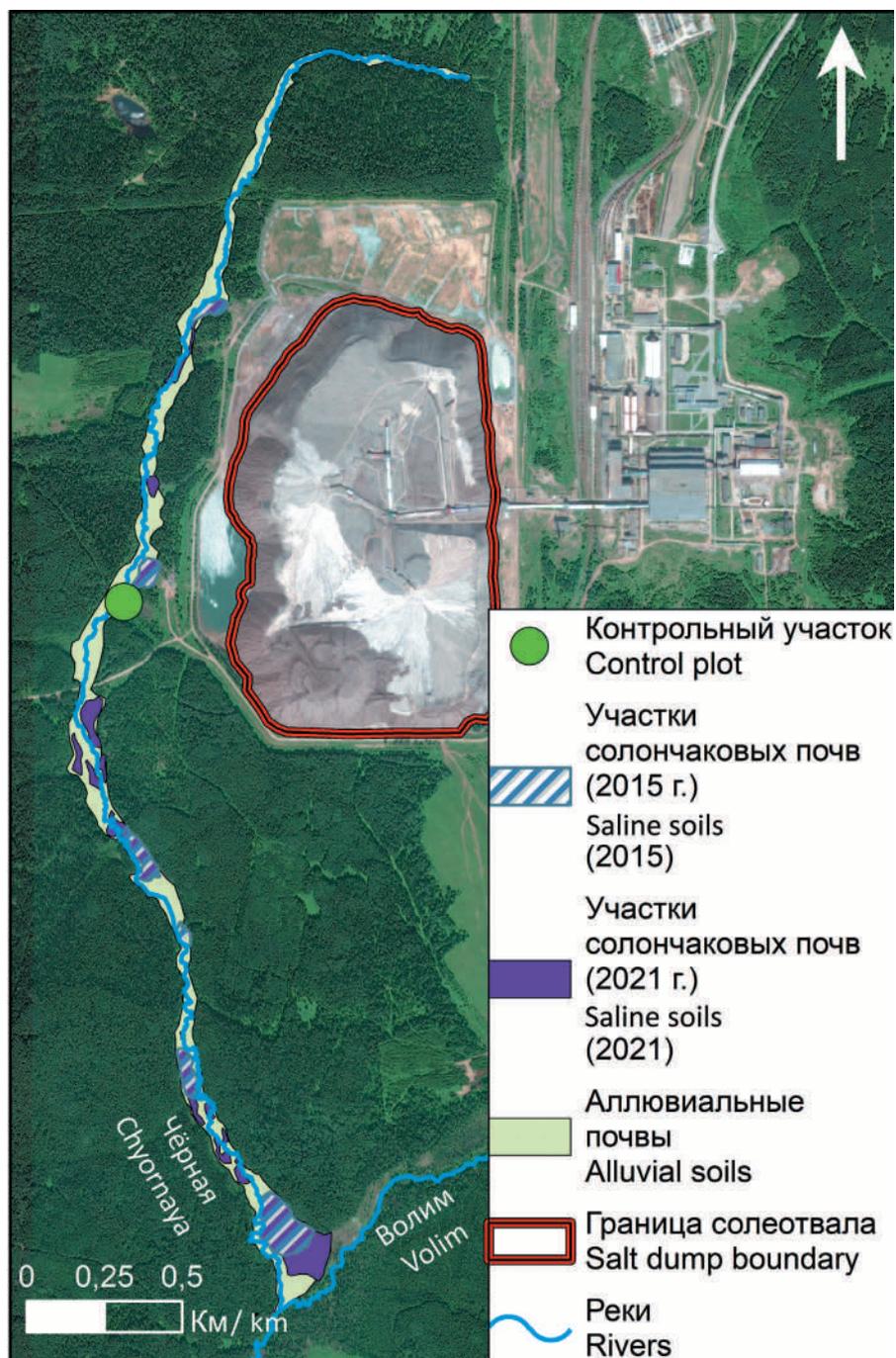


Рис. 3. Картограмма распространения изреженной солеустойчивой растительности в пойме р. Чёрной в 2015 и 2021 гг.

Fig. 3. The distribution of salt-tolerant plants in the Chyornaya River floodplain in 2015 and 2021

О. З. Еремченко, Е. Е. Малышкина, И. В. Пахоруков
«Распространение солеустойчивой растительности
в поймах при техногенном засолении почв». С. 161.



Рис. 4. Картограмма распространения изреженной
солеустойчивой растительности в пойме р. Лёнвы в 2015 и 2021 гг.
Fig. 4. The distribution of salt-tolerant plants in the Lyonva River floodplain in 2015 and 2021

А. И. Коротких, Л. В. Кондакова, Л. И. Домрачева, Т. Я. Ашихмина
«Биоплёнки *Nostoc commune* как феномен
многолетней природной вегетации в техногенной среде». С. 209.

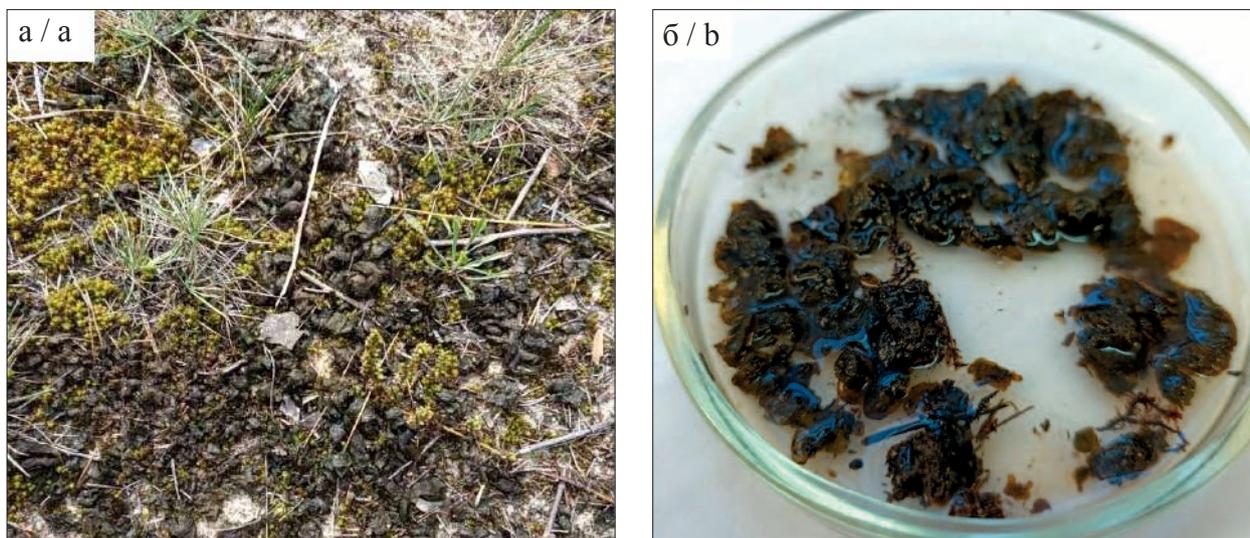


Рис. 1. Внешний вид биоплёнок *Nostoc commune*, сформировавшихся
в естественных местообитаниях (а) и в условиях лабораторного культивирования (б)
Fig. 1. *Nostoc commune* biofilms formed in natural habitats (a) and by laboratory cultivation (b)

Состав растительности на участках исследования / Vegetation composition at the study sites

Семейство / Family	Вид / Species
Apiaceae	Дудник лесной / <i>Angelica sylvestris</i> L.
Asteraceae	Латук татарский / <i>Lactuca tatarica</i> (L.) С.А. Меу.
	Мать-и-мачеха обыкновенная / <i>Tussilago farfara</i> L.
Boraginaceae	Незабудка дернистая / <i>Myosotis cespitosa</i> K.F. Schultz
Caryophyllaceae	Торичник солончаковый / <i>Spergularia salina</i>
Chenopodiaceae	Лебеда раскидистая / <i>Atriplex patula</i> L.
	Лебеда простёртая / <i>Atriplex prostrata</i> Boucher ex DC.
	Марь сизая / <i>Chenopodium glaucum</i> L.
Juncaceae	Ситник жабий / <i>Juncus bufonius</i> L.
Juncaginaceae	Триостренник приморский / <i>Triglochin maritimum</i>
Poaceae	Пырей ползучий / <i>Agropyron repens</i> L. Beauv.
	Вейник наземный / <i>Calamagrostis epigeios</i>
	Ежа сборная / <i>Dactylis glomerata</i> L.
	Тростник обыкновенный / <i>Phragmites australis</i> Cav.
	Бескильница расставленная / <i>Puccinellia distans</i>
Rosaceae	Таволга вязолистная / <i>Filipendula ulmaria</i> L. Maxim.
	Лапчатка гусиная / <i>Potentilla anserina</i> L.

фитами. *Tussilago farfara*, *A. repens*, *A. patula*, *C. epigeios* ранее описаны возле солеотвалов. Предполагают, что их адаптация к засолению идёт за счёт механизмов засухоустойчивости [28]. Остальная растительность представлена луговыми и лугово-болотными травами.

Таким образом, в составе изреженной растительности на исследуемых участках в поймах рек Чёрной и Лёнвы доминировали рудеральные многолетние и однолетние травянистые виды, характеризующиеся определённой солеустойчивостью, а также присутствовали два инвазивных галофита.

Распространение солеустойчивой растительности. На космических снимках пойм двух малых рек, расположенных в зонах стока подземных минерализованных вод от солеотвалов и шламоохранилищ, на основе визуального дешифрирования выявлены участки с изменением растительного покрова. В качестве дешифровочного признака для выявления контуров солеустойчивых растительных сообществ использовался цвет изображения (синтез естественных цветов), позволяющий отличить участки почв, занятых растительностью, от участков почв, лишённых растительного покрова. В синтезе естественных цветов участки, занятые растительностью, отображаются различными оттенками зелёного, а на открытые участки почв указывают различные оттенки серого. При этом оттенки серого цвета зависят от влажности почвы, наличия или отсутствия железистых корок и содержания органического вещества [29].

Пойма р. Чёрной находится под воздействием солеотвала БКПРУ-3, формирование которого началось после запуска рудника в 1973 г. По нашим расчётам площадь поймы р. Чёрной составляет около 30,6 га. В 2015 г. отчётливые признаки формирования изреженного растительного покрова прослежены на площади 4,9 га, что составляет около 16 % территории поймы (рис. 3, см. цв. вкладку III). В 2021 г. площадь изреженной растительности в пойме составила 8,7 га или 28 % от общей площади поймы. Таким образом, в период с 2015 по 2021 гг. территория, занятая солеустойчивой растительностью в пойме р. Чёрной, увеличилась в 1,8 раза; ежегодно она возрастала в среднем на 0,63 га.

Площадь поймы р. Лёнвы составляет около 180 га. В обследованной нами части поймы изреженная растительность в 2015 г. занимала около 14 га (7,8 % поймы). В 2021 г. общая площадь изреженной растительности выросла до 22,2 га, что составляет 12,4 % площади поймы (рис. 4, см. цв. вкладку IV). За шестилетний период (2015–2021 гг.) территория, занятая солеустойчивой растительностью в пойме р. Лёнвы, увеличилась в 1,6 раза. Ежегодное увеличение площади с солеустойчивой растительностью составило в среднем 1,37 га.

Заключение

При современных технологиях поверхностного складирования солевых отходов в

производстве калийных солей в поймах малых рек Чёрной и Лёнвы прогрессирует процесс смены характерной пойменной растительности южно-таёжной подзоны на солеустойчивые изреженные сообщества, представленные однолетними и многолетними видами местной рудеральной растительности с участием инвазивных галофитов – торичника солончакового и триостренника приморского. Распространению солеустойчивых видов благоприятствует техногенное калиево-натриевое хлоридное засоление, достигающее сильной степени в корнеобитаемом слое аллювиальных почв. Засоление аллювиальных почв развивается на фоне как слабощелочной, так и кислой реакции среды, при слабо восстановительных и окислительных условиях. В течение последних лет в поймах рек Чёрной и Лёнвы ежегодный прирост площади, занимаемой солеустойчивой растительностью, составляет в среднем 0,6 и 1,4 га соответственно.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 24-27-00324).

Литература

- Enríquez-de-Salamanca Á. Causes of vegetation synanthropisation in Central Spain // *Landsc Ecol.* 2023. V. 38. P. 3371–3388. doi: 10.1007/s10980-023-01622-0
- Абрамова Л.М., Миркин Б.М. Эволюция растительности на стыке тысячелетий // Теоретические проблемы экологии и эволюции: третьи Любимцевские чтения. Тольятти: Изд-во ИЭВБ РАН, 2000. С. 15–23.
- Галимов Э.Э., Файзуллин Н.Н. Современное состояние изучения проблемы синантропной флоры и растительности // *Инновации. Наука. Образование.* 2022. № 51. С. 1807–1814.
- Wilkoń-Michalska J. Łąki zasolone w dolinie Noteci na odcinku Małty-Nakło // *Rocz. Nauk Roln., Ser. F-2.* 1957. No. 72. P. 893–920.
- Wilkoń-Michalska J. Halofity Kujaw // *Stud. Soc. Sci. Torun. Sec. D (Botanica).* 1963. V. 7. No. 1. P. 3–122.
- Westhus W., Fritzlär F., Pusch J., van Elsen T., Andres C., Grossmann M., Pfützenreuter S., Sparmberg H., Barthel K.J. Binnensalzstellen in Thüringen – situation, gefährdung und schutz. Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt, 1997. 193 p.
- Schmeisky H., Podlacha G. Natural revegetation of saline waste dumps – drought tolerant specialists and halophytes // *Landsc. Urban Plann.* 2000. V. 51. No. 2–4. P. 159–163. doi: 10.1016/s0169-2046(00)00106-7
- Piernik A. Inland halophilous vegetation as indicator of soil salinity // *Basic Appl. Ecol.* 2003. V. 4. No. 6. P. 525–536. doi: 10.1078/1439-1791-00154
- Шишконова Е.А. Антропогенная растительность территорий предприятий ОАО «Уралкалий» (Пермская область) // *Социально-экологические технологии.* 2017. № 3. С. 65–79.
- Четина О.А., Ерёмченко О.З., Пахоруков И.В. Накопление низкомолекулярных соединений как ответная реакция растений на техногенное засоление // *Экология.* 2023. № 2. С. 94–102. doi: 10.31857/S036705972302004X
- Ерёмченко О.З., Пахоруков И.В., Шестаков И.Е. Развитие солончакового процесса в почвах долин малых рек таёжно-лесной зоны в связи с производством калийных солей // *Почвоведение.* 2020. № 4. С. 483–494. doi: 10.31857/S0032180X2004005X
- Сайранова П.Ш., Хайрулина Е.А., Митракова Н.В., Порошина Н.В. Моделирование как прогноз трансформации почв при техногенном засолении // *Теоретическая и прикладная экология.* 2023. № 4. С. 52–60. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-052-060
- Симакова М.С. Методика картирования почв Прикаспийской низменности по материалам аэрофотосъёмки // *Почвенно-географические исследования и использование аэрофотосъёмки в картировании почв.* М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 283–357.
- Конюшкова М.В. Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 316 с.
- Vorob'eva L.A., Pankova E.I. Saline-alkali soils of Russia // *Eurasian Soil Science.* 2008. V. 41. No. 5. P. 457–470. doi: 10.1134/S1064229308050013
- Добровольский Г.В., Балабко П.Н., Стасюк Н.В., Быкова Е.П. Аллювиальные почвы речных пойм и дельт и их зональные отличия // *Аридные экосистемы.* 2011. Т. 17. № 3. С. 5–13.
- Кауричев И.С., Шишова В.С. Окислительно-восстановительные условия почв лёгкого механического состава Мещёрской низменности // *Почвоведение.* 1967. № 75. С. 66–78.
- Смирнова М.А., Козлов Д.Н. Почвенные свойства как индикаторы параметров водного режима почв (обзор) // *Почвоведение.* 2023. № 3. С. 353–369. doi: 10.31857/S0032180X22601037
- Mitsch W.J., Gosselink J.G. *Wetlands.* New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 722 p.
- Michael P.S. The roles of surface soil carbon and nitrogen in regulating the surface soil pH and redox potential of sulfidic soil materials of acid sulfate soils // *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* 2018. V. 41. No. 4. P. 1627–1641.
- Пахоруков И.В., Ерёмченко О.З. Динамика кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий в аллювиальных техногенно засоленных почвах таёжно-лесной зоны // *АгроЭкоИнфо.* 2023. № 4. Статья 15. doi: 10.51419/202134414

22. Хитров Н.Б., Горохова И.Н., Кравченко Е.И. Солевое состояние почв в постирригационных условиях на Генераловской оросительной системе в Волгоградской области // Почвоведение. 2022. № 8. С. 1056–1070. doi: 10.31857/S0032180X2208007X

23. Alavilli H., Awasthi J.P., Rout G.R., Sahoo L., Lee B.H., Panda S.K. Overexpression of a barley aquaporin gene, *HvPIP2;5* confers salt and osmotic stress tolerance in yeast and plants // Front. Plant Sci. 2016. V. 7. Article No. 1566. doi: 10.3389/fpls.2016.01566

24. Volkov V., Beilby M.J. Editorial: Salinity tolerance in plants: Mechanisms and regulation of ion transport // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. Article No. 1795. doi: 10.3389/fpls.2017.01795

25. Guo H., Huang Z., Li M., Hou Z. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses // Sci. Rep. 2020. V. 10. No. 1. Article No. 21844. doi: 10.1038/s41598-020-79045-z

26. Rozentsvet O.A., Nesterov V.N., Bogdanova E.S. Structural, physiological, and biochemical aspects of salinity tolerance of halophytes // Russ. J. Plant Physiol. 2017. V. 64. No. 4. P. 464–477. doi: 10.1134/S1021443717040112

27. Mazer S.J., Lowry D.E. Environmental, genetic, and seed mass effects on winged seed production in the heteromorphic *Spergularia marina* (Caryophyllaceae) // Funct. Ecol. 2003. V. 17. No. 5. P. 637–650. doi: 10.1046/j.1365-2435.2003.00768.x

28. Ерёмченко О.З., Четина О.А., Кусакина М.Г., Шестаков И.Е. Техногенные поверхностные образования зоны солеотвалов и адаптация к ним растений. Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. 148 с.

29. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. 190 с.

References

1. Enríquez-de-Salamanca Á. Causes of vegetation synanthropisation in Central Spain // Landsc. Ecol. 2023. V. 38. P. 3371–3388. doi: 10.1007/s10980-023-01622-0

2. Abramova L.M., Mirkin B.M. The evolution of vegetation during the turn of the millennia // Theoretical problems of ecology and evolution: the third Lyubishchev Readings. Tolyatti: Izdatelstvo IEVB RAN, 2000. P. 15–23 (In Russian).

3. Galimov E.E., Fayzullin N.N. Current status of studying the issue of synanthropic flora and vegetation // Innovatsii. Nauka. Obrazovanie. 2022. No. 51. P. 1807–1811 (in Russian).

4. Wilkoń-Michalska J. Łąki zasolone w dolinie Noteci na odcinku Mątwy-Nakło // Roczn. Nauk Roln., Ser. F-2. 1957. No. 72. P. 893–920 (in Polish).

5. Wilkoń-Michalska J. Halofity Kujaw // Stud. Soc. Sci. Torun. Sec. D (Botanica). 1963. V. 7. No. 1. P. 3–122. (in Polish).

6. Westhus W., Fritzljar F., Pusch J., van Elsen T., Andres C., Grossmann M., Pfützenreuter S., Sparmberg H.,

Barthel K.J. Binnensalzstellen in Thüringen – situation, gefährdung und schutz. Jena: Thüringer Landesanstalt für Umwelt, 1997. 193 p. (in German).

7. Schmeisky H., Podlacha G. Natural revegetation of saline waste dumps – drought tolerant specialists and halophytes // Landsc. Urban Plann. 2000. V. 51. No. 2–4. P. 159–163. doi: 10.1016/s0169-2046(00)00106-7

8. Piernik A. Inland halophilous vegetation as indicator of soil salinity // Basic Appl. Ecol. 2003. V. 4. No. 6. P. 525–536. doi: 10.1078/1439-1791-00154

9. Shishkonakova E.A. Anthropogenic vegetation in the area of the enterprise “Uralkaliy” (Perm region, Russia) // Sotsialno-ekologicheskije tekhnologii. 2017. No. 3. P. 65–79 (in Russian).

10. Chetina O.A., Eremchenko O.Z., Pakhorukov I.V. Accumulation of low-molecular-weight compounds in plants in response to technogenic soil salinization // Ecologia. 2023. No. 2. P. 94–102 (in Russian). doi: 10.31857/S036705972302004X

11. Eremchenko O.Z., Pakhorukov I.V., Shestakov I.E. Development of the solonchak process in soils of small river valleys in the taiga-forest zone in relation to the production of potassium salts // Pochvovedenie. 2020. No. 4. P. 483–494 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X2004005X

12. Sairanova P.Sh., Khayrulina E.A., Mitrakova N.V., Poroshina N.V. Modeling as a tool for soil transformation forecasting under technogenic salinization // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4 P. 52–60 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-052-060

13. Simakova M.S. The methodology of mapping the soils of the Caspian lowland based on aerial photography // Soil-geographical research and the use of aerial photography in soil mapping. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1959. P. 283–357 (in Russian).

14. Konyushkova M.V. Digital mapping of soils of the saline complexes of the Northern Caspian Sea. Moskva: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2014. 316 p. (in Russian).

15. Vorob'eva L.A., Pankova E.I. Saline-alkali soils of Russia // Eurasian Soil Science. 2008. V. 41. No. 5. P. 457–470. doi: 10.1134/S1064229308050013

16. Dobrovol'skiy G.V., Balabko P.N., Stasjuk N.V., Bykova E.P. Alluvial soils of fluvial floodplains and deltas and their zonal differences // Arid ecosystems. 2011. V. 17. No. 3. P. 5–13 (in Russian).

17. Kaurichev I.S., Shishova B.C. Redox conditions of soils of light mechanical composition of the Meschera Lowlands // Pochvovedenie. 1967. No. 75. P. 66–78 (in Russian).

18. Smirnova M.A., Kozlov D.N. Soil properties as indicators of soil moisture regime parameters (a review) // Pochvovedenie. 2023. No. 3. P. 353–369 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22601037

19. Mitsch W.J., Gosselink J.G. Wetlands. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. 722 p.

20. Michael P.S. The roles of surface soil carbon and nitrogen in regulating the surface soil pH and redox potential of sulfidic soil materials of acid sulfate soils // *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.* 2018. V. 41. No. 4. P. 1627–1641.
21. Pakhorukov I.V., Eremchenko O.Z Dynamics of acid-base and redox conditions in alluvial technogenically saline soils of the taiga forest zone // *AgroEcoInfo.* 2023. No. 4. Article No. 15 (in Russian). doi: 10.51419/202134414
22. Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I. Soil salinity status under post-irrigation conditions at the Generalovskaya Irrigation System in the Volgograd Region // *Pochvovedenie.* 2022. No. 8. P. 1056–1070 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X2208007X
23. Alavilli H., Awasthi J.P., Rout G.R., Sahoo L., Lee B.H., Panda S.K. Overexpression of a barley aquaporin gene, *HvPIP2;5* confers salt and osmotic stress tolerance in yeast and plants // *Front. Plant Sci.* 2016. V. 7. Article No. 1566. doi: 10.3389/fpls.2016.01566
24. Volkov V., Beilby M.J. Editorial: Salinity tolerance in plants: Mechanisms and regulation of ion transport // *Front. Plant Sci.* 2017. V. 8. Article No. 1795. doi: 10.3389/fpls.2017.01795
25. Guo H., Huang Z., Li M., Hou Z. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. No. 1. Article No. 21844. doi: 10.1038/s41598-020-79045-z
26. Rozentsvet O.A., Nesterov V.N., Bogdanova E.S. Structural, physiological, and biochemical aspects of salinity tolerance of halophytes // *Russ. J. Plant Physiol.* 2017. V. 64. No. 4. P. 464–477. doi: 10.1134/S1021443717040112
27. Mazer S.J., Lowry D.E. Environmental, genetic, and seed mass effects on winged seed production in the heteromorphic *Spergularia marina* (Caryophyllaceae) // *Funct. Ecol.* 2003. No. 17. P. 637–650. doi: 10.1046/j.1365-2435.2003.00768.x
28. Eremchenko O.Z., Chetina O.A., Kusakina M.G., Shestakov I.E. Technogenic superficial formations of zone of salt slag-heap and adaptation to them of plants. Perm: Permskiy gosudarstvennyy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet, 2013. 148 p. (in Russian).
29. Kravtsova V.I. Space-based soil research methods. Moskva: Aspekt Press, 2005. 190 p. (in Russian).

Тканеспецифичная экспрессия генов транспортных белков у обыкновенного карпа (*Cyprinus carpio*) под воздействием ионов кадмия

© 2026. К. В. Золотарёв¹, н. с., А. Н. Михайлов¹, н. с.,
М. В. Михайлова¹, к. б. н., зав. лабораторией,
В. И. Наход¹, м. н. с., Д. Д. Жданов^{1, 2}, д. б. н., зав. лабораторией, доцент,

¹Научно-исследовательский институт биомедицинской химии,
119121, Россия, г. Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 8,

²Российский университет дружбы народов,
117198, Россия, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
e-mail: fireaxe@mail.ru

Cd^{2+} – катион тяжёлого металла, имеющий как типичные для этого класса токсикантов, так и уникальные токсические свойства по отношению к живым компонентам водных экосистем. Целью исследования является анализ индуцированной Cd^{2+} экспрессии генов транспортных белков в ряде тканей рыбы и её возможной корреляции с накоплением Cd в тканях. Молодь обыкновенного карпа (*Cyprinus carpio*) инкубировали в растворе Cd^{2+} с сублетальной концентрацией для карповых (6,4 мг/л). Был сопоставлен уровень экспрессии генов субъединиц N-метил-D-аспартата (*NR2A*, *NR2B*) и белка 1 подсемейства С АТФ-связывающей кассеты (*ABCC1*) в тканях рыб, подвергавшихся и не подвергавшихся воздействию Cd^{2+} , а также проанализирована степень биоаккумуляции Cd тканями рыб. Экспрессия *NR2A* в глазах (сосудистая оболочка + сетчатка), накапливавших Cd, усиливалась в 16,6 раз под его воздействием, и достоверно не менялась в мозге, не накапливавшем Cd. Этот эффект может быть обусловлен блокированием кальциевых каналов ионами Cd^{2+} , имеющими очень близкий радиус иона к Ca^{2+} . В результате установлено, что близость радиуса катиона тяжёлого металла к радиусу Ca^{2+} является основным фактором, определяющим способность катиона необратимо блокировать кальциевые каналы. Экспрессия *ABCC1* усиливалась в 2,0 раза в жабрах и достоверно не менялась в печени, при этом обе ткани накапливали Cd в значительной степени. Этот эффект может быть обусловлен попаданием Cd в печень в уже инактивированном виде, а также возможными различиями в механизмах самозащиты от Cd^{2+} в жабрах и печени рыб.

Ключевые слова: кадмий, биоаккумуляция, *NR2A*, кальциевые каналы, *ABCC1*, механизмы самозащиты.

Cd^{2+} -induced tissue-specific expression of genes involved in cellular transportation in Eurasian carp (*Cyprinus carpio*)

© 2026. K. V. Zolotarev¹ ORCID: 0000-0003-0905-0605[†], A. N. Mikhailov¹ ORCID: 0000-0003-0990-7509[†]
M. V. Mikhailova¹ ORCID: 0000-0001-7121-5453[†], V. I. Nakhod¹ ORCID: 0000-0003-2322-4966[†]
D. D. Zhdanov^{1, 2} ORCID: 0000-0003-4753-7588[†]

¹Institute of Biomedical Chemistry,

10, Pogodinskaya St., Moscow, Russia, 119121,

²Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),

6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, Russia, 117198,

e-mail: fireaxe@mail.ru

Cd^{2+} is a heavy metal cation with some typical for heavy metals as well as unique toxic properties for live components of water ecosystems. The objective of this study was to analyze Cd^{2+} -induced expression of genes of some cellular transportation proteins in several tissues of a fish and its possible correlation with Cd accumulation in tissues. Juvenile *Cyprinus carpio* were treated with Cd^{2+} at a preliminarily determined sublethal concentration for Cyprinidae (6.4 mg/L). The expression of N-methyl-D-aspartate receptor subunit genes (*NR2A*, *NR2B*) and ATP-binding cassette subfamily C member 1 gene (*ABCC1*) was compared between treated and untreated fish. In addition, cadmium accumulation in the fish tissues was assessed. *NR2A* gene expression was 16.6-fold upregulated by Cd^{2+} in the eyes (choroid + retina), which accumulated Cd, and was not upregulated in brain, which didn't accumulate Cd. This may have been caused by the blocking of calcium channels by Cd^{2+} , which has a very similar ionic radius to that of Ca^{2+} . According to the result of the current study, it can be concluded that the similarity of the radius of a heavy metal cation to that of Ca^{2+} is a major factor contributing to its ability to irreversibly block calcium channels. *ABCC1* gene expression was 2.0-fold upregulated in

gills and was not upregulated in liver; both tissues accumulated high levels of Cd. This difference may have been caused by the accumulation of predominantly previously inactivated Cd in liver or by some difference in the mechanisms of self-detoxification from Cd²⁺ in fish gills and liver.

Keywords: cadmium, accumulation, *NR2A*, calcium channels, *ABCC1*, self-detoxification.

Тяжёлые металлы (ТМ) являются приоритетными загрязнителями гидросферы наряду с такими веществами, как фенолы, полиароматические углеводороды и пестициды [1]. Хотя ТМ не являются наиболее токсичными загрязнителями и обладают меньшей острой токсичностью, чем некоторые органические вещества, источники их поступления в воду очень разнообразны [2]. Как естественные, так и антропогенные источники способствуют концентрированию ТМ в воде и их биоаккумуляции в водных организмах [3]. Тяжёлые металлы – группа химических элементов с большой атомной массой. Большинство из них существует в воде в катионной форме и обладает сильной способностью образовывать органические комплексы. Катионы ТМ имеют несколько свободных электронных d-подуровней, в которые могут входить электронные пары из атомов N, S или O биологически активных веществ. Кроме того, существуют уникальные, но не до конца ясные механизмы токсического действия ТМ. Некоторые из этих механизмов связаны со структурой ионов, тогда как другие связаны с уникальными химическими свойствами ионов (например, окислительной способностью Cu²⁺).

Кадмий (Cd) – один из ТМ с уникальными токсическими свойствами. В нескольких исследованиях за последние десятилетия была предпринята попытка прояснить токсические эффекты кадмия на клеточном и организменном уровнях [4]. Эти исследования показали, что Cd²⁺ является канцерогенным и иммунотоксичным, а также косвенным путём, но в значительной мере вызывает окислительный стресс [5, 6].

Рецепторы N-метил-D-аспартата (NMDAR) являются рецепторами и ионными каналами нейронов [7] и функционируют как транспортные белки для Ca²⁺. Zn²⁺ ингибирует проницаемость каналов NMDAR [8]. NMDAR представляют собой гетеротетрамеры, состоящие из четырёх субъединиц, включая субъединицы NMDAR2A (*NR2A*) и/или NMDAR2B (*NR2B*). Эти рецепторы играют ключевую роль в передаче синаптического сигнала и когнитивных функциях [9]. Они считаются катионозависимыми и потенциаль-

ными мишенями для токсического действия Cd²⁺. Некоторые данные показывают, что Cd²⁺ специфически токсичен для нервной системы, однако полностью не ясно, как он влияет на развитие нервной ткани водных организмов [10].

Белок 1 подсемейства САТФ-связывающей кассеты (*ABCC1*), также известный как белок мультилекарственной устойчивости 1 (*MRP1*), представляет собой мембранный транспортный белок, участвующий в транспорте широкого спектра веществ [11]. Субстратами *ABCC1* являются амфифильные анионы и конъюгаты глутатиона, потенциально способные связывать Cd²⁺ [12]. *ABCC1* участвует в процессе защиты от токсического действия ионов ТМ, включая Cd²⁺, в различных модельных животных и клеточных культурах [13].

Цель исследования – анализ индуцированной Cd²⁺ экспрессии *NR2A*, *NR2B* и *ABCC1* в ряде тканей рыбы *Cyprinus carpio* и её возможной корреляции с накоплением Cd в тканях.

Объекты и методы исследования

Молодь обыкновенного карпа (*Cyprinus carpio*) является подходящей моделью для тестирования острой токсичности на взрослых рыбах в соответствии с рекомендациями OECD 203 [14]. Рыба, использованная в этом исследовании, была выращена в прудах экспериментального рыбоводного хозяйства ООО «ИБМХ-ЭкоБиоТех» в Тверской области. Эксперимент проводился летом. За две недели до начала эксперимента отобранных экспериментальных рыб переносили в резервуары и поддерживали в экспериментальных условиях, указанных в OECD 203 (ресоставленная вода, комнатная температура, аэрация, 14-часовой световой день, контроль pH, обновление 40 % воды каждые 4 дня). Рыб кормили специальным гранулированным кормом для карпа К-110 (Пуховичский хлебокомбинат, Марьина Горка, Беларусь) ежедневно за 24 ч до эксперимента; суточная порция корма составляла примерно 3 % от общей массы рыбы. Для эксперимента были отобраны здоровые карпы (общая длина 30–35 см, масса 430–580 г; 5 рыб в качестве необработанного контроля и 5 рыб для обработки раствором Cd²⁺).

В первый день инкубации рыб перемещали во вновь подготовленные резервуары, содержащие ресоставленную воду (контроль) или ресоставленную воду, содержащую растворённый $\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$ (реагент аналитической чистоты; производство Sigma-Aldrich, Сент-Луис, Миссури, США) в сублетальной концентрации, при которой не наблюдается вредное воздействие (НОЕС), составляющей 6,4 мг/л Cd^{2+} [15]. Рыбы подвергались воздействию в течение 96 ч (статический тест) в тех же условиях инкубации без кормления и обновления раствора. Затем рыбу подвергали анестезии в ледяной воде и препарировали. Образцы тканей (головной мозг, жабры, печень, глаза, скелетные мышцы, сердце и почки) хранили в морозильной камере при -70°C до дальнейшего анализа. Для анализа образцы отделяли от примесных тканей. В качестве образцов глаз использовались сосудистые оболочки с сетчаткой.

Содержание Cd в тканях измеряли с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500ce (Agilent Technologies, Санта-Клара, Калифорния, США) (ICP-MS). Образцы ткани растворяли, растворяли в концентрированной HNO_3 , используя микроволновую печь Milestone Start D (Milestone S.r.l., Соризоле, Италия), а затем разбавляли деионизированной водой. Концентрацию Cd^{2+} измеряли в количественном режиме с использованием предварительно приготовленных калибровочных стандартов Cd^{2+} в соответствии с протоколом [16]. Стандарты были приготовлены с использованием того же $\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, что и для инкубации рыб. Тот же метод был использован для проверки действующей концентрации Cd^{2+} в воде экспериментального бассейна (которая составляла 6,394 мг/л до загрузки рыб).

Для количественного анализа методом ПЦР в реальном времени (кПЦР) образцы тканей гомогенизировали и общую РНК экстрагировали с помощью набора для экстракции РНК LRU-100-50 (Биолабмикс, Новосибирск, Россия). Концентрацию выделенной РНК определяли при помощи спектрофотометра Nanodrop 2000 (Thermo Fisher Scientific, Уолтем, Массачусетс, США). Обратную транскрипцию и кПЦР выполняли, как описано ранее [17]: из каждого образца по 5 мкг общей РНК подвергали обратной транскрипции с использованием набора MMLV RT (Евроген, Москва, Россия) в 25 мкл реакционной смеси, а затем проводили кПЦР в реальном времени с помощью амплификатора DTrime5 (ДНК-

Технология, Протвино, Россия). Реакционную смесь готовили с помощью реагента qPCRmix-NS SYBR (Евроген, Москва, Россия) в соответствии с рекомендациями производителя с использованием следующих праймеров (5'-3'):

- ген *NR2A* прямой:
AGTGCAGACACAGCTCAGAC;
- ген *NR2A* обратный:
ACTCTTCATGGACAAGCGGG;
- ген *NR2B* прямой:
CCTGCAAGCGATGTGATTTCG;
- ген *NR2B* обратный:
GCGCAAAACCTTACCACCTG;
- ген *ABCC1* прямой:
GGGTAGGACAGGAGCAGGAA;
- *ABCC1* обратный:
GCAATGAACCAGAAAACAGAA;
- референсный ген β -актина *ACTB* прямой:
GATGATGAAATTGCCGCACTG;
- референсный ген β -актина *ACTB* обратный:
ACCAACCATGACACCCTGATGT.

Флуоресценцию измеряли в конце стадии элонгации. Анализ кривой флуоресценции проводили в конце реакции (после 45-го цикла) при температуре от 60 до 95 °C для оценки качества конечных продуктов ПЦР. Стандартные кривые эффективности реакции были построены с использованием четырёх последовательно разведённых образцов (разведение 1:40, 1:80, 1:160, 1:320 и 1:640). Экспрессия мРНК была нормализована относительно экспрессии референсного гена β -актина (*ACTB*). Расчёт уровня экспрессии генов проводили с помощью программного обеспечения для работы с прибором DTrime5.

Измерение содержания Cd в тканях и оценку уровня экспрессии генов проводили в 3-кратной повторности. Численные данные представлены в виде «среднее арифметическое \pm среднеквадратичное отклонение» или «среднее арифметическое [минимальное значение; максимальное значение]». Статистическую обработку проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010. Достоверность различий между группами по тому или иному показателю выявляли с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) с оценкой уровня значимости различий p по t -критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Измеренные значения содержания Cd в тканях представлены в таблице 1. Есть данные, что жабры и желудочно-кишечный тракт являются одними из приоритетных путей

Таблица 1 / Table 1

Измеренные значения содержания кадмия (среднее \pm среднеквадратичное отклонение) в тканях карпа после 96 ч воздействия раствора Cd^{2+} с концентрацией 6,4 мг/л (мг/кг сырой массы)
Cadmium content in *Cyprinus carpio* tissues after 96 h of exposure in 6.4 mg/L Cd^{2+} (mean \pm SD; mg/kg wet weight)

Образец Sample type	Ткань / Tissue						
	Мозг Brain	Жабры Gills	Печень Liver	Глаз Eye	Скелетная мышца Skeletal muscle	Сердце Heart	Почка Kidney
Контроль Control	< 0,001	0,12 \pm 0,02	0,16 \pm 0,09	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,79 \pm 0,10
После воздейст- вия Cd^{2+} / After Cd^{2+} exposure	< 0,001	7,29 \pm 0,82	4,30 \pm 0,94	0,17 \pm 0,06	0,04 \pm 0,01	0,20 \pm 0,03	13,70 \pm 2,18

Таблица 2 / Table 2

Уровни экспрессии генов *NR2A*, *NR2B* и *ABCC1* (среднее [минимальное значение; максимальное значение]) в тканях карпа после 96 ч воздействия раствора Cd^{2+} с концентрацией 6,4 мг/л / Expression levels of *NR2A*, *NR2B* and *ABCC1* (median [lower value; upper value]) in *Cyprinus carpio* tissues after 96 h of exposure to 6.4 mg/L Cd^{2+}

Ген Gene	Образец Sample type	Мозг Brain	Жабры Gills	Печень Liver	Глаз Eye	Скелетная мышца Skeletal muscle	Сердце Heart	Почка Kidney
<i>NR2A</i>	Контроль Control	0,11 [0,01; 0,20]	19,6 [0,042; 83,9]	22,1 [0,12; 61,5]	0,63 [0,048; 1,16]	0,14 [0,003; 0,63]	8,30 [0,002; 39,7]	3,38 [0,002; 14,3]
	Cd^{2+}	0,17 [0,03; 0,31]	0,43 [0,23; 0,74]	31,1 [3,97; 51,2]	10,5 [5,99; 13,3]	0,15 [0,008; 0,53]	7,97 [0,006; 31,4]	0,31 [0,26; 0,36]
<i>NR2B</i>	Контроль Control	0,17 [0,004; 0,66]	21,2 [0,029; 101,9]	17,5 [0,042; 52,4]	0,31 [0,002; 0,82]	0,019 [0,008; 0,031]	0,35 [0,001; 0,87]	1,34 [0,001; 5,19]
	Cd^{2+}	0,16 [0,006; 0,51]	0,36 [0,12; 0,77]	18,7 [2,33; 30,9]	6,32 [2,59; 8,93]	0,17 [0,007; 0,63]	8,30 [0,003; 32,6]	0,25 [0,18; 0,32]
<i>ABCC1</i>	Контроль Control	2,76 [2,2 \cdot 10 ⁻¹⁰ ; 12,8]	0,26 [0,12; 0,40]	28,2 [5,79; 51,2]	0,20 [0,004; 0,50]	0,042 [7,8 \cdot 10 ⁻⁶ ; 0,073]	0,23 [7,5 \cdot 10 ⁻⁴ ; 0,61]	2,01 [1,4 \cdot 10 ⁻⁴ ; 8,92]
	Cd^{2+}	0,53 [7,9 \cdot 10 ⁻⁹ ; 2,08]	0,52 [0,42; 0,63]	32,6 [6,42; 58,6]	7,09 [6,9 \cdot 10 ⁻⁵ ; 22,3]	0,45 [2,6 \cdot 10 ⁻⁵ ; 1,78]	8,38 [0,007; 33,2]	0,77 [0,039; 2,11]

накопления химических веществ в рыбе [18]. Это наблюдение было подтверждено результатами настоящего исследования. Жабры накапливали много Cd, но большая часть всего накопленного Cd выводилась или поглощалась почками. Кроме того, значительное количество Cd поглощалось печенью. Гематоэнцефалический барьер предотвращал накопление Cd в головном мозге.

Нормализованные уровни экспрессии *NR2A*, *NR2B* и *ABCC1* представлены в таблице 2.

В большинстве тканей уровни экспрессии *NR2A*, *NR2B* и *ABCC1* сильно варьировали у не

обработанных кадмием (контрольных) рыб, поэтому было, как правило, трудно обнаружить существенные различия в их экспрессии между обработанными и необработанными особями рыб. Тем не менее, экспрессия *NR2A* (нормализованная к экспрессии *ACTB*) в глазах обработанных рыб была в 16,6 раза выше, чем у необработанных (ANOVA $p < 0,05$) (рис. 1а). В мозге, который не накапливал Cd, не было значимых различий между группами по экспрессии *NR2A* (рис. 1б). *NR2A* активируется у рыб в ответ на некоторые ионы ТМ по отдельности и в комбинации, включая Pb^{2+} (10 мкг/л) + Cd^{2+} (5 мкг/л), но его экспрессия

не меняется в ответ на воздействие только Cd^{2+} в следовых количествах – концентрация 5 мкг/л [19]. Результаты текущего исследования показывают, что Cd^{2+} при сублетальной концентрации вызывает значительную активацию *NR2A* в ткани, содержащей значительное количество нейронов.

Вольтамперометрические исследования показали, что Cd^{2+} необратимо блокирует некоторые кальциевые каналы сенсорных нейронов у кошек [20] и кур [21]. Некоторые косвенные доказательства этого явления также существуют. Например, блокатор кальциевых каналов нифедипин ингибирует поглощение Cd^{2+} клетками типа GH_4C_1 гипофиза [22], а блокаторы кальциевых каналов нифедипин, дилтиазем и верапамил значительно ингибируют поглощение Cd^{2+} жабрами у моллюска *Crassostrea virginica* [23]. Радиусы ионов Ca^{2+} (114 пм) и Cd^{2+} (109 пм) близки [24]. Это сходство может быть основной причиной блокирования кальциевых каналов Cd^{2+} , как предполагали ранее [25, 26]. Белок *NR2A* является субъединицей *NMDAR* – транспортного белка для Ca^{2+} . Если *NMDAR* также блокируется Cd^{2+} , то дополнительный биосинтез его субъединиц может помочь рыбе преодолеть вредное воздействие Cd^{2+} .

Радиус неорганического иона ртути Hg^{2+} (116 пм) также близок к радиусу Ca^{2+} [24]. Подобно Cd^{2+} , Hg^{2+} необратимо блокирует кальциевые каналы, как это наблюдается в нейронах спинального ганглия крысы, нейронах брюшного ганглия моллюска *Aplysia californica* [27], нейронах ганглия тройничного нерва крысы [28] и катионные каналы сперматозоидов у мышей [29]. На основании этих данных можно сделать вывод, что близость радиуса катиона ТМ к радиусу Ca^{2+} является основным фактором, определяющим его способность необратимо блокировать кальциевые каналы.

Экспрессия *ABCC1* (нормализованная к *ACTB*) в жабрах обработанных рыб была в 2,0 раза выше, чем в жабрах необработанных рыб (ANOVA $p < 0,05$) (рис. 2а). Cd^{2+} в более низких концентрациях (0,56 и 1,12 мг/л) индуцировал повышение экспрессии *ABCC1* примерно в той же степени в фибробластоподобных клетках (ZF4) и у личинок *Danio rerio* через 120 ч после оплодотворения (в 1,97 и 1,30 раз соответственно) [13]. Следовательно, экспрессия *ABCC1*, по-видимому, незначительно зависит от действующей концентрации Cd^{2+} .

Кроме того, индуцированная Cd^{2+} смертность *ABCC1*-мутантных личинок *Danio rerio*

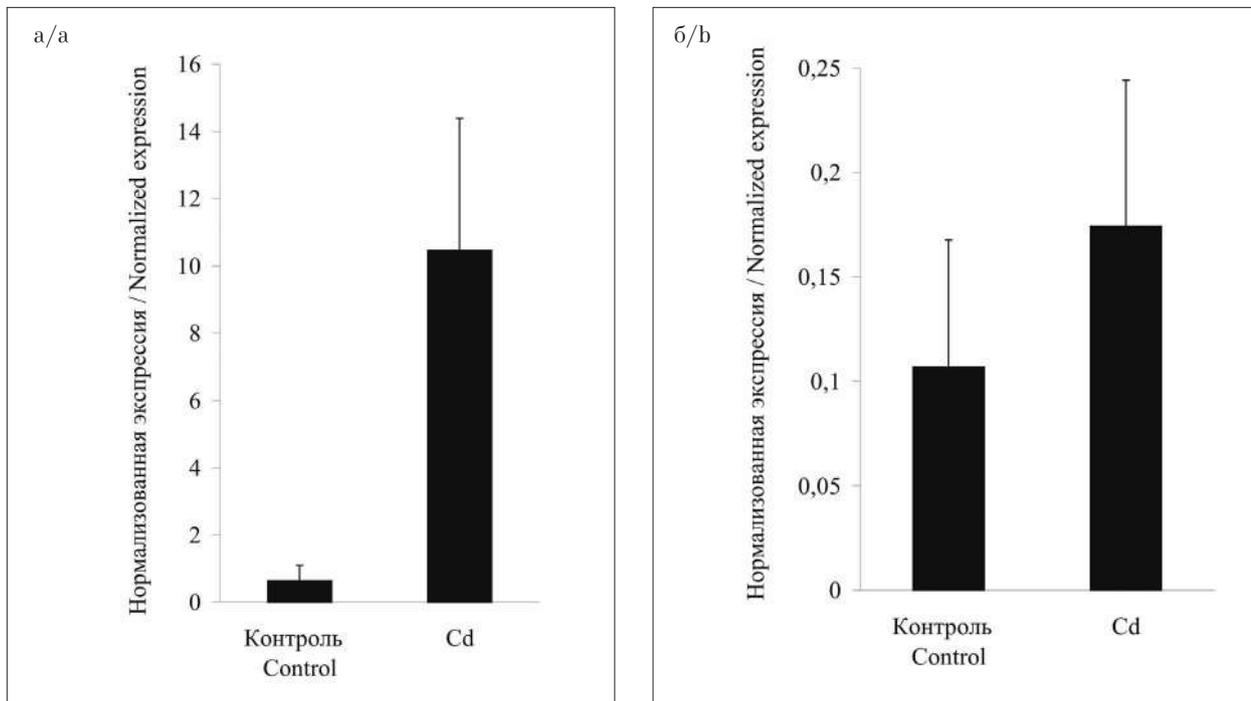


Рис. 1. Экспрессия гена *NR2A* (нормализованная к *ACTB*) в глазах (а) и мозге (б) карпа после 96 ч воздействия раствора Cd^{2+} с концентрацией 6,4 мг/л.

*ANOVA $p < 0,05$ относительно контрольной группы; N = 5

Fig. 1. *NR2A* expression (normalized to *ACTB*) in *Cyprinus carpio* eyes (a) and brain (b) after 96 h of exposure to 6.4 mg/L Cd^{2+} .

*ANOVA $p < 0.05$ relative to the control group; N = 5

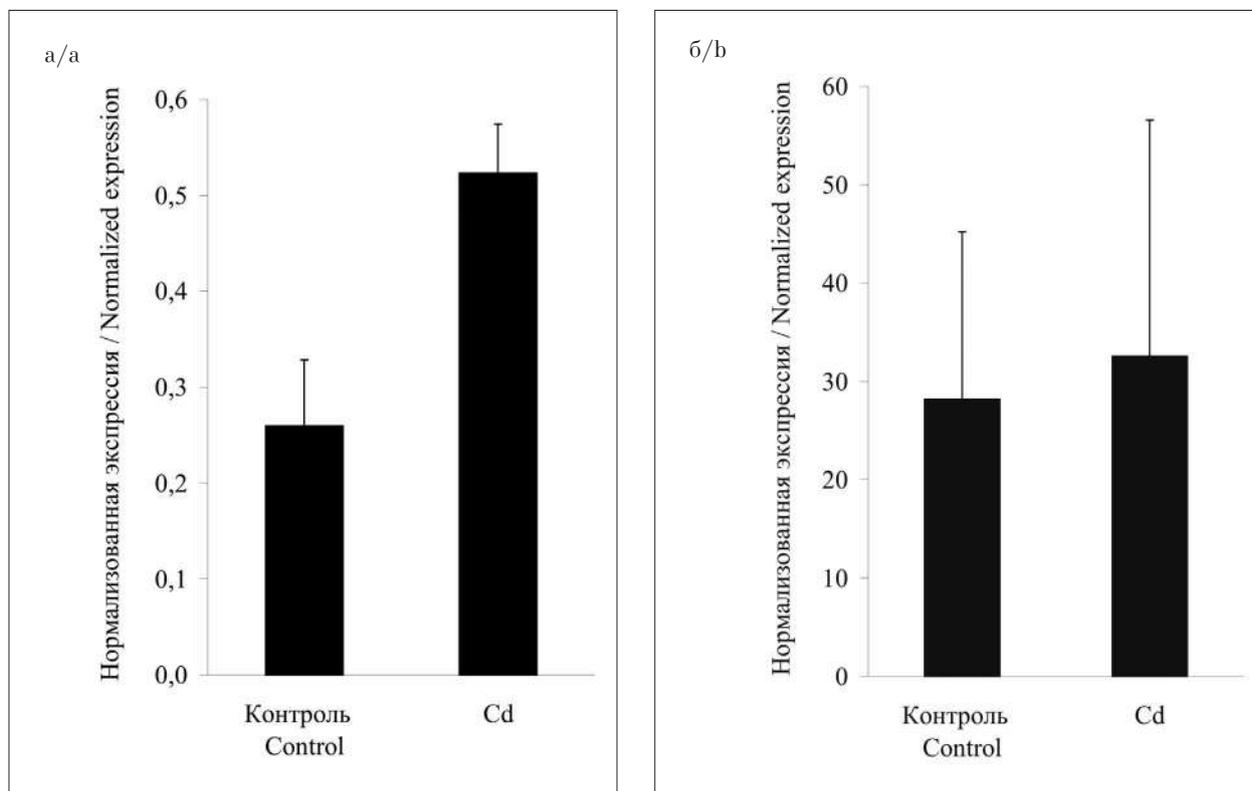


Рис. 2. Экспрессия гена *ABCC1* (нормализованная к *ACTB*) в жабрах (а) и печени (б) карпа после 96 ч воздействия раствора Cd^{2+} с концентрацией 6,4 мг/л.

*ANOVA $p < 0,05$ относительно контрольной группы; N = 5

Fig. 2. *ABCC1* expression (normalized to *ACTB*) in *Cyprinus carpio* gills (a) and liver (b) after 96 h of exposure to 6.4 mg/L Cd^{2+} .

*ANOVA $p < 0.05$ relative to the control group; N = 5

оказалась выше, чем у нативных личинок [13], что говорит о том, что *ABCC1* участвует в защите рыб от Cd^{2+} . Комплексообразование глутатиона с Cd^{2+} – ещё один важный защитный процесс [4]. *ABCC1* – это мембранный транспортный белок, который переносит конъюгаты глутатиона [12]. Эти наблюдения показывают, что *ABCC1* участвует в защите рыб посредством переноса комплекса глутатион- Cd^{2+} , особенно в жабрах рыб. Механизмы самозащиты жабр рыб от вредного воздействия ТМ критически важны для сохранения популяций рыб в водных экосистемах [30].

В печени, которая накапливала много Cd у рыб, подвергшихся воздействию Cd^{2+} , не было значимых различий по экспрессии *ABCC1* между двумя группами (рис. 2b). В процессе инкубации, поскольку рыба не потребляла корма, содержащего Cd, печень могла накапливать Cd только из крови. Следовательно, клеткам печени может не потребоваться инактивация Cd^{2+} с помощью *ABCC1* и глутатиона, поскольку печень накапливает, в основном, ранее инактивированный Cd. Кроме того, могут быть некоторые различия в механизмах

самозащиты от Cd^{2+} между жабрами и печенью у рыб.

Заключение

Молодь карпа *Cyprinus carpio* подвергали воздействию Cd^{2+} в сублетальной концентрации для карповых (6,4 мг/л). Экспрессию генов субъединиц рецептора N-метил-D-аспартата (*NR2A*, *NR2B*) и гена белка 1 подсемейства С АТФ-связывающей кассеты (*ABCC1*) сравнивали у обработанных и необработанных рыб. Кроме того, оценивали накопление Cd в тканях рыб. Экспрессия *NR2A* под действием Cd^{2+} была в 16,6 раза выше в глазах (сосудистая оболочка + сетчатка), которые накапливали Cd, и не изменилась в мозге, который не накапливал Cd. Это могло быть вызвано блокированием кальциевых каналов ионом Cd^{2+} , радиус которого очень близок к радиусу Ca^{2+} . Близость радиуса катиона ТМ к радиусу Ca^{2+} является основным фактором, определяющим способность катиона необратимо блокировать кальциевые каналы.

Экспрессия *ABCC1* была в 2,0 раза выше в жабрах и не изменилась в печени; обе ткани накапливали значительное количество Cd. Эта разница могла быть вызвана накоплением преимущественно ранее инактивированного Cd в печени и/или некоторыми различиями в механизмах самозащиты от Cd²⁺ в жабрах и печени рыб.

Результаты данного исследования дают представление о молекулярных механизмах токсичности Cd²⁺ для водных организмов и их защите от Cd²⁺. Кроме того, предполагается, что уровни экспрессии этих генов могут использоваться в качестве диагностических индикаторов результативности неблагоприятного воздействия Cd²⁺ на водные экосистемы.

Работа выполнена в рамках темы «Влияние соединений, обладающих геропротективными свойствами, на единичные биомакромолекулы, модельные объекты и организм человека» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-15-2024-643).

References

- Javed M., Usmani N. An overview of the adverse effects of heavy metal contamination on fish health // Proc. Natl. Acad. Sci., India, Sect. B: Biol. Sci. 2019. V. 89. P. 389–403. doi: 10.1007/s40011-017-0875-7
- An Y.J., Kampbell D.H. Total, dissolved, and bioavailable metals at Lake Texoma marinas // Environ. Pollut. 2003. V. 122. No. 2. P. 253–259. doi: 10.1016/s0269-7491(02)00291-9
- Thomson E.A., Luoma S.N., Johansson C.E., Cain D.J. Comparison of sediments and organisms in identifying sources of biologically available trace metal contamination // Water Res. 1984. V. 18. No. 6. P. 755–765. doi: 10.1016/0043-1354(84)90172-6
- Sandbichler A.M., Höckner M. Cadmium protection strategies – a hidden trade-off? // Int. J. Mol. Sci. 2016. V. 17. No. 1. Article No. 139. doi: 10.3390/ijms17010139
- Stohs S.J., Bagchi D., Hassoun E., Bagchi M. Oxidative mechanisms in the toxicity of chromium and cadmium ions // J. Environ. Pathol. Toxicol. Oncol. 2000. V. 19. No. 2. P. 201–213. doi: 10.1615/JEnvironPatholToxicolOncol.v20.i2.10
- Valko M., Morris H., Cronin M.T.D. Metals, toxicity and oxidative stress // Curr. Med. Chem. 2005. V. 12. No. 10. P. 1161–1208. doi: 10.2174/0929867053764635
- Cull-Candy S., Brickley S., Farrant M. NMDA receptor subunits: diversity, development and disease // Curr. Opin. Neurobiol. 2001. V. 11. No. 3. P. 327–335. doi: 10.1016/s0959-4388(00)00215-4
- Traynelis S.F., Burgess M.F., Zheng F., Lyuboslavsky P., Powers J.L. Control of voltage-independent zinc inhibition of NMDA receptors by the NR1 subunit // J. Neurosci. 1998. V. 18. No. 16. P. 6163–6175. doi: 10.1523/JNEUROSCI.18-16-06163.1998
- Li F., Tsien J.Z. Memory and the NMDA receptors // N. Engl. J. Med. 2009. V. 361. No. 3. P. 302–303. doi: 10.1056/NEJMcibr0902052
- Rios C., Méndez-Armenta M. Cadmium neurotoxicity // Encyclopedia of environmental health / Ed. J.O. Nriagu. Ann Arbor, MI: University of Michigan, School of Public Health, 2019. P. 485–491. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11571-4
- Toyoda Y., Hagiya Y., Adachi T., Hoshijima K., Kuo M.T., Ishikawa T. MRP class of human ATP binding cassette (ABC) transporters: historical background and new research directions // Xenobiotica. 2008. V. 38. No. 7–8. P. 833–862. doi: 10.1080/00498250701883514
- Keppler D., Cui Y., König J., Leier I., Nies A. Export pumps for anionic conjugates encoded by MRP genes // Adv. Enzyme Regul. 1999. V. 39. No. 1. P. 237–246. doi: 10.1016/s0065-2571(98)00015-6
- Long Y., Li Q., Cui Z. Molecular analysis and heavy metal detoxification of ABCC1/MRP1 in zebrafish // Mol. Biol. Rep. 2011. V. 38. No. 3. P. 1703–1711. doi: 10.1007/s11033-010-0283-z
- OECD. Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals. Paris: OECD Publishing, 2019. 24 p. doi: 10.1787/9789264069961-en
- Liu P., Wang S., Chang Z., Li L., Xing H., Dong W. Combined toxicity of silica nanoparticles and cadmium chloride on the cardiovascular system of zebrafish (*Danio rerio*) larvae // Comp. Biochem. Physiol. C: Toxicol. Pharmacol. 2021. V. 239. Article No. 108895. doi: 10.1016/j.cbpc.2020.108895
- Yamamoto T., Arai Y., Seki T. RoHS/ELV directives – measurement of heavy metals using ICP-MS // Agilent ICP-MS Journal. 2005. No. 23. Article No. 2.
- Vasina D.A., Zhdanov D.D., Orlova E.V., Orlova V.S., Pokrovskaya M.V., Aleksandrova S.S., Sokolov N.N. Apoptotic endonuclease EndoG inhibits telomerase activity and induces malignant transformation of human CD4⁺ T cells // Biochemistry (Mosc.). 2017. V. 82. No. 1. P. 24–37. doi: 10.1134/S0006297917010035
- Erickson R.J., Nichols J.W., Cook P.M., Ankley G.T. Bioavailability of chemical contaminants in aquatic systems // The toxicology of fishes / Eds. R.T. Di Giulio, D.E. Hinton. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008. P. 9–54. doi: 10.1201/9780203647295.ch2
- Cobbina S.J., Mao G., Zhao T., Xu H., Zhang Z., Liu H., Zou Y., Wu X., Yang L. Modulation of N-Methyl-D-Aspartate receptors (NMDAR), Bcl-2 and C-Fos gene expressions on exposure to individual and mixtures of low concentration metals in zebrafish (*Danio rerio*) // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2017. V. 72. No. 3. P. 418–427. doi: 10.1007/s00244-016-0352-y
- Taylor W.R. Permeation of barium and cadmium through slowly inactivating calcium channels in cat sensory

- neurons // *J. Physiol.* 1988. V. 407. No. 1. P. 433–452. doi: 10.1113/jphysiol.1988.sp017424
21. Swandulla D., Armstrong C.M. Calcium channel block by cadmium in chicken sensory neurons // *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 1989. V. 86. No. 5. P. 1736–1740. doi: 10.1073/pnas.86.5.1736
22. Hinkle P.M., Kinsella P.A., Osterhoudt K.C. Cadmium uptake and toxicity via voltage-sensitive calcium channels // *J. Biol. Chem.* 1987. V. 262. No. 34. P. 16333–16337. doi: 10.1016/S0021-9258(18)49259-9
23. Roesijadi G., Unger M.E. Cadmium uptake in gills of the mollusk *Crassostrea virginica* and inhibition by calcium channel blockers // *Aquat. Toxicol.* 1993. V. 24. No. 3–4. P. 195–205. doi: 10.1016/0166-445X(93)90071-8
24. Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // *Acta Cryst.* 1976. V. A32. P. 751–767. doi: 10.1107/S0567739476001551
25. Choong G., Liu Y., Templeton D.M. Interplay of calcium and cadmium in mediating cadmium toxicity // *Chem. Biol Interact.* 2014. V. 241. P. 54–65. doi: 10.1016/j.cbi.2014.01.007
26. Ferro J.P., Ferrari L., Eissa B.L. Acute toxicity of cadmium to freshwater fishes and its relationship with body size and respiratory strategy // *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol.* 2021. V. 248. Article No. 109109. doi: 10.1016/j.cbpc.2021.109109
27. Pekel M., Platt B., Büsselberg D. Mercury (Hg^{2+}) decreases voltage-gated calcium channel currents in rat DRG and *Aplysia* neurons // *Brain Res.* 1993. V. 632. No. 1–2. P. 121–126. doi: 10.1016/0006-8993(93)91146-j
28. Yin X., Sun J.Z., Mei Y., Guo X., Chen S.L., Wang Z.L., Yang L. Effect of Hg^{2+} on voltage-dependent calcium channels and intracellular free calcium in trigeminal ganglion neurons of rats // *Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases.* 2008. V. 26. No. 9. P. 542–545 (in Chinese).
29. Mohammadi S., Gholamin M., Mohammadi M., Mansouri A., Mahmoodian R., Attari S., Kebriaei S.M., Zibaei B., Roshanaei M., Daneshvar F., Khandehro M., Khodadadegan M.A., Delshad A., Mohammadzadeh F., Peyvandi M., Ghayour-Mobarhan M., Tavallaie S., Boroumand-Noughabi S., Ferns G.A.A. Down-regulation of CatSper 1 and CatSper 2 genes by lead and mercury // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2018. V. 59. P. 82–86. doi: 10.1016/j.etap.2018.03.007
30. Olkova A.S., Sysolyatina M.A. Sources, toxicity and bioaccumulation of rare earths in the environment: review // *Theoretical and Applied Ecology.* 2024. No. 1. P. 19–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-019-030

Assessment of the hereditary component of fluoride ecotoxic load

© 2026. V. I. Starichenko ^{ORCID: 0000-0001-9744-916X}
Institute of Plants and Animal Ecology UB RAS,
202, Vos'mogo Marta St., Yekaterinburg, Russia, 620144,
e-mail: starichenko@ipae.uran.ru

Fluoride is one of the most toxic and widely spread industrial pollutants of the environment. Identifying the hereditary component of fluoride accumulation plays a special role in environmental issues of fluoride pollution, as contributing to maintaining its level across generations. However, the factors of individual variability of fluoride accumulation in mammals, in particular, the hereditary component of accumulation variability, have not been identified. This is due to the methodological features of studying fluoride deposition parameters that are inaccessible in direct environmental observations. An experimental study on laboratory mice allows us to estimate the magnitude of the hereditary component of fluoride deposition. The fluoride accumulation was studied in the progeny of three strains of inbred mice (intrastrain correlation) against the background conditions and following chronic intake of the toxicant. The variant of the family analysis (intrafamily correlation) was also used. It is a classical approach to the hereditary variation of quantitative traits assessment. Fluoride entered the female mice body with food during the whole gestation period and up to the age of 1.5 month of the progeny. The assessment was performed with the control of the animal sex and litter size effect. Individual parameters of fluoride accumulation differed in certain experimental groups by 3–6.5 times. At the same time the specifics of fluoride accumulation was typical of the entire families. Combined hereditary component (intrastrain and intrafamily) of the fluoride accumulation was comparable with the hereditary correlation of morphological characteristics with known hereditary dependence of development ($R = 0.50–0.56$, $p < 0.0001$ and $R = 0.45–0.53–0.58$, $p < 0.0001$ respectively). Notably, the family component of the variability depending on the analysis option (the entire sample or just the experimental group) is comparable and exceeds the animal's strain effect by 2–3 times. For background fluoride level the hereditary dependence of its deposition is statistically insignificant. The results obtained can be extrapolated to field rodents.

Keywords: environmental toxicology, fluoride, bone tissue, inbred mouse strains, ANOVA, intraclass correlation coefficient, familial analysis.

УДК [615.916.1:546.16]+591.1+575.1

Оценка наследственной компоненты фторной экотоксической нагрузки

© 2026. В. И. Стариченко, д. б. н., в. н. с.,
Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН,
620144, Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202,
e-mail: starichenko@ipae.uran.ru

Фтор – один из наиболее токсичных и широко распространённых промышленных загрязнителей природной среды. В экологических проблемах фторного загрязнения выявление наследственной компоненты его накопления играет особую роль как способствующей поддержанию его уровня в ряду поколений. Однако факторы индивидуальной изменчивости аккумуляции фтора у млекопитающих, в частности, наследственная составляющая вариабельности накопления, не выявлены. Это обусловлено методологическими особенностями исследования параметров депонирования фтора, недоступных для изучения в прямых экологических наблюдениях. Экспериментальное исследование на лабораторных мышах позволяет оценить величину наследственной компоненты депонирования фтора. Исследовали накопление фтора у потомства трёх линий инбредных мышей (внутрилинейная корреляция) в фоновых условиях и после хронического поступления токсиканта. Использовался также вариант семейного анализа (внутрисемейная корреляция). Это классический подход к оценке наследственной изменчивости количественных признаков. Самки получали фтор с пищей в течение всего периода беременности и до 1,5-мес. возраста потомства. При оценке учитывали эффект влияния пола животных и величины помёта в семье. Аккумуляция фтора у отдельных индивидов различалась в некоторых экспериментальных группах в 3–6,5 раз. В то же время особенности депонирования фтора оказались характерными для целых семейств. Общая наследственная составляющая (внутрилинейная и внутрисемейная) кумуляции фтора

сопоставима с наследственной корреляцией морфологических признаков, имеющих высокую наследственную детерминацию развития ($R = 0,50-0,56, p < 0,0001$ и $R = 0,45-0,53-0,58, p < 0,0001$ соответственно). В зависимости от варианта анализа (вся выборка или только опытная группа), семейная составляющая изменчивости сопоставима или значительно выше (в 2–3 раза) эффекта линейной принадлежности животных. Для фоновых уровней фтора наследственная обусловленность его депонирования статистически незначима. Полученные результаты могут быть экстраполированы на полевых грызунов.

Ключевые слова: экологическая токсикология, фтор, костная ткань, линейные мышцы, дисперсионный анализ, коэффициент внутрикласовой корреляции, метод семейного анализа.

In the context of technogenic environmental pollution, the fluoride occupies one of the first places in terms of toxicity. It could be found in the emissions of the aluminum industry, ferrous industry, fertilizer production, ceramics and others. Damage by the fluoride and its compounds is viewed as general toxic one. However, its main acceptor is bone tissue where up to 90 % of the toxicant that enters the bloodstream accumulates irrespective of the routes of entry [1–5]. Fluoride incorporated in the skeleton retains in the bone tissue for a long time, thus becoming the permanent source of internal intoxication of the body.

A lot of publications are devoted to the study of the fluoride influence on the human and vertebrates animal body [1, 3, 6–11]. Their acute effects are manifested by respiratory failure, severe gastroenteritis, vomiting, diarrhea, shortness of breath, convulsions, ventricular tachycardia and other symptoms. Chronic effects lead to fluorosis, arthrosis-arthritis, skeletal and dental anomalies, and disruption of the immune and reproductive function [5].

Fluorides effects are studied in detail from the medical-hygienic and veterinary perspectives. It is known that for people exposed to the equal level the hazardous chemical, the effect may differ by two or three orders of magnitude [12].

For example, it was observed that the development and severity of the fluorosis in the aluminum production employees exposed to industrial intoxication almost similar in terms of intensity and time, differs considerably: in some individuals the health status remains unchanged for a long period of time, whereas others develop severe diseases [5, 13, 14].

In natural populations of small rodents inhabiting the areas adjacent to the ecotoxic enterprises some fluoride-resistant individuals could be found. Apparently, it is genetically preconditioned by the individual variability of fluoride sensitivity. Its range in wild populations is great. Population reactivity under chronic exposure to fluoride pollution is largely non-specific and is similar in manifestation to

reactivity in radiation biocenoses, i. e. changes in reproduction, population size, and disrupted animal migration are observed. When exposed to number of generations, hereditary adaptation to a fluorotoxic environment develops [5]. Also, transgenerational epigenetic modification is induced in rodents of different species living in areas contaminated with various pollutants (including fluorides) [15].

The data on fluoride accumulation in the rodent skeleton [5, 10, 16] demonstrated that the scatter of its values could not be completely associated with the difference in consumed food and water rich in toxic elements and polluted air. For example, fluoride concentration in the skeleton of the house mouse (*Mus musculus*) in the vicinity of Tadzhih aluminum plant varies from 4700 to 16000 $\mu\text{g/g}$ of the bone tissue [5].

In the works devoted to the ecology of mammals in a technogenically polluted natural environment with fluorine and fluorides, as well as industrial intoxication in humans, the indication of the individual variability of toxicant accumulation and its effect is limited only to the statement of its presence [5, 12–14].

The reason of such variability effect of the toxicant is on the one hand the individual sensitivity of the body to the effect of similar doses of the damaging factor, on the other hand – specific features of the toxicant kinetics (its distribution in organs and tissues and the period of time of its presence in the body). Genetic dependence of the sensitivity to the fluoride effects was shown in a lot of studies [8, 17, 18].

However, when studying the hereditary factors of the resistance, only body sensitivity to the fluoride effect is taken into account while the individual characteristics of the skeletal metabolism stay aside. And the mechanism of the development is not clear. Obviously, the development of the approaches to solve the task of individual prediction of the health status due to the damage by bone-seeking toxicants together with the evaluation of the body's sensitivity to the damaging factor requires due account of the individual metabolic activity of the skeleton.

Hereditary study of both the development of skeletal morphology and calcium metabolism is indirect evidence of the fact that the deposition of other bone-seeking substances in the skeleton also has hereditary component. It is logical to study the issue of hereditary determination of fluoride metabolism in an experiment, and to transfer the findings to natural populations of animals, humans and large farm animals.

In a laboratory experiment intrasrain comparisons are used to assess the hereditary component of variability. They proved themselves well in terms of qualitative parameters. However, for quantitative characteristics such assessments often give unsatisfactory results [19]. The classical approach to the assessing the hereditary component of the variability of quantitative parameters is the family analysis that does not require any genetic concept. Since all the individuals of the strain have the same genotype, family analysis could reveal possible epigenetic effects that alter the substance accumulation.

The present study is a continuation of investigating the hereditary (epigenetic) factors of bone-seeking substance accumulation (in particular ^{90}Sr) in the mammalian skeleton in mouse models [20, 21]. In addition to the interstrain comparison, we also used family analysis (the twin families' method).

The provision of the rationale of hereditary component of fluoride accumulation is within the scope of the toxicology and occupational pathology. The study of the heredity effect in the environmental problems of fluoride pollution, along with radionuclide contamination in nuclear accidents and carcinogenic petrochemical products, plays a special role. Epigenetic modification plays a significant role in the reactivity of rodents in impact territories, and their ability to adapt to a toxic environment is discussed. At the same time, experimental data should be representative enough to extrapolate to wild rodents, the most numerous order of mammals, and useful for studying other vertebrates from their natural habitat. Notably, some important aspects of the fluoride metabolism, for example, epigenetic inheritance, started to be discussed only recently. The issues of fluorosis also did not lose their importance [11, 14, 19, 22].

The aim of the study is to evaluate the hereditary (strain and family) component of the variability of fluoride deposition in bone tissue of the laboratory inbred mice under background and chronic intake.

Objects and methods of research

All experiments were carried out in accordance with Protocol No. 14 of the Bioethics Commission of the Institute of Plants and Animal Ecology UB RAS dated May 12, 2023.

In the study we used sexually mature laboratory CBA (from the Nursery "Rappolovo"), BALB/c (from the Nursery "Stolbovaya") and BC mice (the offspring of the second generation hybrids from the cross breeding of animal strains BALB/c – female and CBA – male, breeding during 10 years via closely related crossing and that have reached complete inbreeding), that were crossbred in the vivarium of the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Science. Fluoride deposition in bone tissue was studied on the progeny of the mice of these strains.

Background levels of the fluoride accumulation were studied in the control group (vivarium ration); in the experimental group – after ingestion of an intoxicant (0.5 g/L sodium fluoride solution; 1 mL per mouse). The offspring received fluoride after birth – first with their mother's milk, then with food when they began to feed themselves (offspring age at the time of euthanasia was 1.5 months).

Since the birth of the offspring, the animals were kept by families (female and its litter). The ration of all the animals was enriched with in excess mineral feed of lump chalk and fresh greens to avoid calcium and vitamins deficit. After a month since birth females were separated from the offspring. The euthanasia of the offspring was performed by cervical vertebrae dislocation [23, 24]. After euthanasia the weight of the animal bodies, femur, and fluoride concentration in bone tissue were measured.

Fluoride in bone was measured with potentiometric method using fluoride-selective electrode after preliminary treatment of samples [25]. Fluoride concentration was expressed in $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ of dry bone. Family and strains of the animals were taken into account.

The subsequent dispersion analysis was based on the assumption of distribution normality of the analyzed parameters. Since the fluoride concentration both in the experimental and in the control groups had lognormal distribution, to follow the normality supposition logarithmic transformation was used. However, to simplify the expression we use the word combination "fluoride concentration", implying both the concentration itself and concentration logarithm. Body weight and femur weight have the distri-

bution that does not differ from the normal one.

Method of the family analysis has widely been used in research on heredity and presupposes the study of the manifestation of the traits in children, parents and close relatives. Its variant – method of twin families – is a combination of family and twin methods. The manifestation of the studied marker is compared in biologically related individuals irrespective of the fact whether the parents covariation is known – offspring or not [26]. The given methods belong to correlation studies.

Under the term “family” in this study we understand only the offspring of one female. It is connected with the fact that the comparison of data on fluoride accumulation in parents and children is incorrect due to the overwhelming contribution of age specific features to the value of deposition.

The progeny from 79 families was studied in the experiment (the number of animals $n = 582$): experimental group – 56 families ($n = 416$ animals); control group – 23 families ($n = 166$ animals). The number of the pups in families at birth varied in the range 2–20. But due to mothers’ cannibalism by the end of the experiment three families had only one pup left. Experiment scheme is depicted in Figure 1.

Hereditary (strain and family) component of the changeability of fluoride accumulation in bone tissue was evaluated in comparison to the changeability of morphological characteristics

(body weight and femur weight). Hereditary dependence of their development is known [19, 27–29].

Coefficient of intraclass correlation (R) that corresponds to the effect of the factors “strain” and “family” was used as an estimator. Assessment was performed with the control of the animal sex effect as well as the conditions of their development (different level of fluoride intake) and litter size in the family.

The term “random effects” in the context of dispersion analysis is used to designate factors which levels were not fixed beforehand, but were obtained from the sample during the experiment. Factors which levels are defined by the researcher are named fixed. It is assumed that the levels of a random factor are randomly selected from the general totality of all possible levels. In our case the heredity of the different strains and families within the strains cannot be completely known, that is we cannot study all the possible strains and families. Statistical analysis is based on a mixed model if some factors are assumed to be random, and some are fixed [30]. The assessment is performed only for the random factor.

Statistical conclusions (with 5 % significance level) were made based on a linear model with mixed effects where the factors “group”, “sex” and covariate “litter size” were considered as fixed, and factor “family” as random. Factor “strain” was either fixed or random (depending on the particular assessment of the factors).

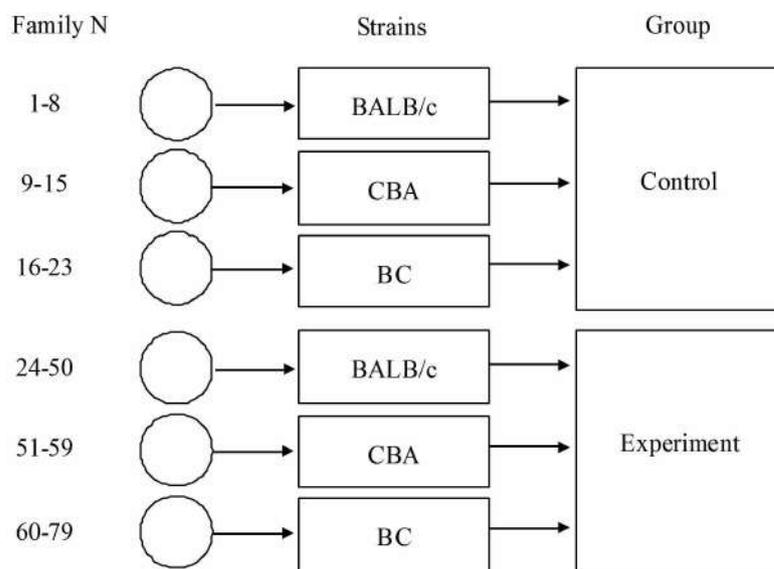


Fig. 1. The scheme of distribution of families in BALB/c, CBA and BC mice by experimental groups: control (background level of the fluoride), experiment (chronic fluoride intake). *Here and further in the figures and tables: CBA – mice from the Nursery “Rappolovo”, BALB/c – mice from the Nursery “Stolbovaya”, BC – the offspring of the second generation hybrids from the cross breeding of animal strains BALB/c (female) and CBA (male), the vivarium of the Institute of Plants and Animal Ecology UB RAS*

The assessment was carried out only for a random factor. Covariate (secondary independent variable) “litter size” was included into the analysis as it is known that for prolific mammals the number of the pups in the litter is one of the sources of the variability in the offspring weight indicator. That is why in experiments to assess the hereditary dependence of weight parameters, the number of offspring is artificially equalized or taken into account in statistical data processing.

The levels of the “family” factor are grouped within the “strain” fluoride level (Fig. 1). To get *F*-statistics for the studied effects in a mixed model of dispersion analysis the denominator synthesis was used [30, 31]. The coefficient of intraclass correlation (*R*) corresponding to the ratio of the dispersion component of the respective random factor to the complete dispersion, served as the estimator of the hereditary component of variability [31] (the percentage dispersion component is $R \cdot 100\%$).

The data were described with the mean and standard error and medians with quartiles. The significance of differences between the samples was assessed using Student’s *t*-test and Newman-Keuls test. Statistical conclusions were made with 5 % significance ($p < 0.05$).

The data was analyzed using a licensed software package Microsoft Excel 2003 and Statistica 6.0 (StatSoft Inc.).

Results and discussion

The values of the weight characteristics and fluoride concentration in bone tissue of the experimental animals are given in Table 1.

Intergroup differences. A decrease in the body weight and femur weight was revealed in the animals from the experimental groups relative to the control (body weight 16.4 ± 0.1 g and 17.9 ± 0.2 g; femur weight: 0.0578 ± 0.0004 g and 0.0609 ± 0.0009 g, respectively). It could be either due to direct inhibitory effect of the fluoride in the period when they start to eat solid food or due to antenatal and postnatal effects of the fluoride that went through the placenta into the fetus blood during gestation period or was consumed with mother’s milk [1, 2, 5, 32].

Intergroup differences in fluoride accumulation (control groups – 160 ± 2 $\mu\text{g/g}$, experimental groups – 2719 ± 45 $\mu\text{g/g}$) are associated with the different level of its receipt: control – background levels; experimental – chronic receipt.

Interstrain differences. When strains were compared in the control and experimental groups it turned out that the differences in the fluoride

concentration between them are statistically insignificant (according to the Newman-Keuls Test), except for the CBA strain in the experimental group (Table 1). Considerable effect of the animals’ strain on the fluoride accumulation was revealed only with the subsequent use of dispersion analysis.

Differences between males and females.

The effect of the animal sex on weight values was not registered in all experimental groups (Table 1), although sex dimorphism of the weight in the majority of vertebrate species is well-known. The above effect (at the level of strains inside the group) on the fluoride accumulation was not observed. It is confirmed by the findings of many studies. In most of them the existence of sex-specific metabolism (of the fluoride and other bone-seeking elements) is not even discussed [2, 3, 32–34]

An exception is the pregnancy and lactation period when changes in the mineral metabolism are going on in the body of a female animal [35]. Another exception is the period of rapid growth when the skeleton weight is being formed. The rate of substance accumulation and its amount during this period differ in males and females because of the sex dimorphism in the skeleton size (body size) [36].

Individual differences. Individual values of fluoride deposition differ in some experimental groups in 3.0–6.5 times (variation coefficient of the fluoride concentration is – 23.5–36.5 %, of weight values – 9.9–16.2 %). Fluoride concentration in the bone tissue in some specimens in the control group varies from 90 to 268 $\mu\text{g/g}$ and corresponds to the background level of this element content in the bone tissue of the mammals and humans – 50–450 $\mu\text{g/g}$ [2, 5, 32, 37, 38]. In the experimental group fluoride accumulation is an order of magnitude higher – 980–6430 $\mu\text{g/g}$.

Notably, these specific features of fluoride accumulation typically relate to the entire families. The range of individual parameters of the deposition inside single families of the experimental groups is presented in Figure 2.

Dispersion analysis

Effect of the “strain” and “family” factor in the entire sample of animals. Results of the dispersion analysis of the effect of the “strain” and “family” factors are given in Table 2. Effect of the factors is statistically significant ($p < 0.0001$) for all the parameters. The contribution of the effect of the factor “strain” to the fluoride accumulation is 16.5 %, and to the development of the morpho-

Table 1

Weight characteristics and fluoride concentrations in bone tissue of the experimental and control animals (M ± m)

Group	Sex	n	Body weight, g	Femur weight, g	F, µg/g
Control	BALB/c				
	Males	17	21.0 ± 0.5	0.0729 ± 0.0023	161 ± 6
	Females	24	19.8 ± 0.3	0.0681 ± 0.0013	153 ± 7
	Group average	41 (8)*	20.3 ± 0.3 (15.0–25.7)**	0.0701 ± 0.0013 (0.0590–0.0895)	156 ± 5 (110–260)
	CBA				
	Males	17	17.6 ± 0.7	0.0573 ± 0.0027	161 ± 7
	Females	21	16.5 ± 0.6	0.0582 ± 0.0024	148 ± 6
	Group average	38 (7)	17.0 ± 0.4 (10.0–20.2)	0.0578 ± 0.0018 (0.0327–0.0775)	154 ± 5 (100–235)
	BC				
	Males	47	17.7 ± 0.4***	0.0587 ± 0.0018	168 ± 5
	Females	40	16.5 ± 0.3	0.0571 ± 0.0017	159 ± 5
	Group average	87 (8)	17.1 ± 0.3 (11.8–24.6)	0.0580 ± 0.0011 (0.0386–0.0902)	164 ± 4 (90–268)
	Group average	166 (23)	17.9 ± 0.2 (10.0–25.7)	0.0609 ± 0.0009 (0.0327–0.0902)	160 ± 2 (90–268)
Experimental****	BALB/c				
	Males	81	17.9 ± 0.3***	0.0574 ± 0.0010	2773 ± 97
	Females	77	16.8 ± 0.3	0.0563 ± 0.0010	2603 ± 106
	Group average	158 (27)	17.4 ± 0.2 (8.6–25.1)	0.0569 ± 0.0007 (0.0347–0.0777)	2690 ± 72 (980–6430)
	CBA				
	Males	26	17.4 ± 0.2***	0.0594 ± 0.0010***	2957 ± 144
	Females	33	15.2 ± 0.2	0.0517 ± 0.0009	3141 ± 123
	Group average	59 (9)	16.2 ± 0.2 (10.0–19.1)	0.0551 ± 0.0008 (0.0405–0.0683)	3060 ± 94 (1720–5300)
	BC				
	Males	92	16.2 ± 0.3***	0.0598 ± 0.0010	2697 ± 92
	Females	107	15.3 ± 0.2	0.0588 ± 0.0009	2592 ± 100
	Group average	199 (20)	15.7 ± 0.2 (7.4–20.9)	0.0593 ± 0.0007 (0.0319–0.0803)	2640 ± 68 (1000–5140)
	Group average	416 (56)	16.4 ± 0.1 (7.4–25.1)	0.0578 ± 0.0004 (0.0319–0.0803)	2719 ± 45 (980–6430)

Note: * – number of families in the group, ** – min–max, *** – the differences between males and females are significant at P < 0.05 (Student’s t-test), **** – fluoride receipts in antenatal and postnatal period.

logical characteristics – 15–30 %, the “family” factor is 41.7 % and 46–48 %, respectively.

General hereditary component of the changeability (intrastrain plus intrafamily) in the entire sample of animals. The contribution of the factors “strain” and “family” to the total hereditary component of the changeability of the studied parameters is 52.9 % (13.5 and 39.4 %, respectively) for the body weight; 57.8 % (19.1 and 38.7 %, respectively) for the femur; 50.3 % (14.7 and 35.6 %, respectively) for the fluoride concentration (Table 3). It is clear that the changeability component dependent on the factor “strain” is 2–3 times less than the effect of

the factor “family” both for the morphological and metabolic characteristics.

Hereditary component of variability (total intrastrain and intrafamily) for the control and experimental groups separately. Taking into account the discussion of the value of the total hereditary component of the changeability, it is of interest to perform analysis in the control and experimental groups separately. The data of Tables 4 and 5 are clearly demonstrated graphically in Figure 3.

The analysis of the control group has demonstrated that hereditary dependence of the fluoride accumulation for the background levels is not

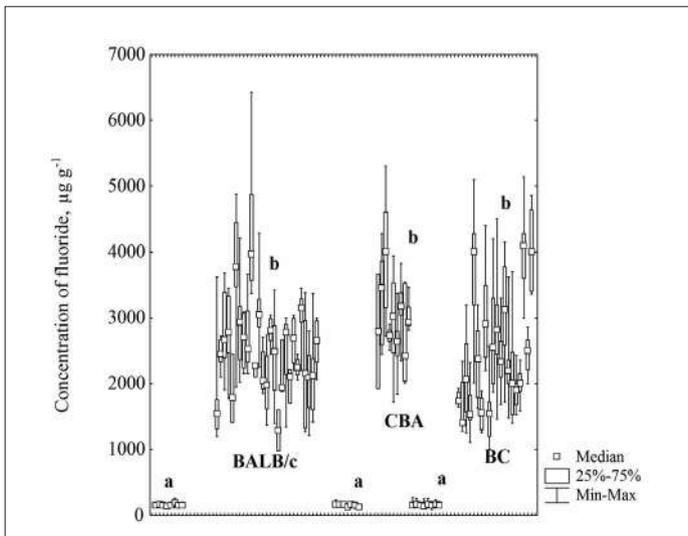


Fig. 2. Fluoride concentration ($\mu\text{g/g}$) in the bone tissue of the inbred mouse strains in certain families from the control (a) and experimental (b) groups ($n = 582$, number of families – 79)

Table 2

Coefficient of the intrastrain / intrafamily correlation of weight parameters and fluoride concentration in experimental animals ($n = 582$, 79 families)

Source of variance	Effect		Residue		F	$p \leq$	R	
	Type	df	MS	df				MS
Body weight (intrastrain correlation)								
Litter size	Fixed	1	996.62	2.11	63.89	15.60	0.0537	–
Group*	Fixed	1	370.75	19.56	5.82	63.73	0.0001	–
Sex	Fixed	1	220.54	436.13	4.19	52.62	0.0001	–
Strain	Random	2	105.64	576.00	4.04	26.13	0.0001	0.155
Body weight (intrafamily correlation)								
Litter size	Fixed	1	996.62	64.56	27.79	35.86	0.0001	–
Group	Fixed	1	370.75	69.14	20.21	18.34	0.0001	–
Sex	Fixed	1	207.90	273.76	3.87	53.69	0.0001	–
Strain	Fixed	2	111.96	73.25	16.52	6.78	0.0020	–
Family	Random	74	16.01	502.00	2.28	7.03	0.0001	0.455
Femur weight (intrastrain correlation)								
Litter size	Fixed	1	178693.9	2.07	57306.94	3.12	0.2153	–
Group	Fixed	1	222803.6	10.97	3925.78	56.75	0.0001	–
Sex	Fixed	1	9341.0	311.95	2431.54	3.84	0.0509	–
Strain	Random	2	95677.4	576.00	2294.63	41.70	0.0001	0.229
Femur weight (intrafamily correlation)								
Litter size	Fixed	1	631071.7	65.26	52363.93	12.05	0.0009	–
Group	Fixed	1	179172.7	69.51	37982.57	4.72	0.0333	–
Sex	Fixed	1	52083.5	258.11	6971.25	7.47	0.0067	–
Strain	Fixed	2	275632.6	73.31	30980.45	8.90	0.0003	–
Family	Random	74	30014.6	502.00	3944.81	7.61	0.0001	0.478
Fluoride concentration, In (intrastrain correlation)								
Litter size	Fixed	1	1.23	2.10	1.35	0.91	0.4372	–
Group	Fixed	1	930.99	17.75	0.12	7939.53	0.0001	–
Sex	Fixed	1	0.35	418.86	0.08	4.18	0.0415	–
Strain	Random	2	2.24	576.00	0.08	28.12	0.0001	0.165
Fluoride concentration, In (intrafamily correlation)								
Litter size	Fixed	1	1.23	63.29	0.51	2.42	0.1249	–
Group	Fixed	1	930.99	68.48	0.37	2513.03	0.0001	–
Sex	Fixed	1	0.34	301.69	0.08	4.49	0.0350	–
Strain	Fixed	2	2.24	73.15	0.30	7.36	0.0012	–
Family	Random	74	0.29	502.00	0.05	6.17	0.0001	0.417

Note to Tables 2–5: df – number of degrees of freedom; MS – mean square deviation; * – experimental groups: control, fluoride receipts; bold font – the random factor being analyzed and the corresponding coefficient of the intrastrain/intrafamily correlation (R); a dash in a cell indicates that no assessment is performed for fixed factors.

Table 3

General coefficient of the hereditary (intrastrain and intrafamily) correlation of weight parameters and fluoride concentration in experimental animals ($n = 582, 79$ families)

Source of variance	Effect			Residue		F	p ≤	R	Σ R
	Type	df	MS	df	MS				
Body weight									
Litter size	Fixed	1	996.62	3.32	80.29	12.41	0.0330	–	–
Group	Fixed	1	370.75	63.62	21.77	17.03	0.0001	–	–
Sex	Fixed	1	220.54	242.92	4.02	54.86	0.0001	–	–
Strain	Random	2	105.64	73.26	16.51	6.40	0.0028	0.135	–
Family	Random	74	16.01	502.00	2.28	7.03	0.0001	0.394	0.529
Femur weight									
Litter size	Fixed	1	631071.7	2.93	196182.9	3.22	0.1731	–	–
Group	Fixed	1	179172.7	56.25	42246.9	4.24	0.0441	–	–
Sex	Fixed	1	53158.2	201.62	7361.9	7.22	0.0078	–	–
Strain	Random	2	275095.2	73.32	30964.1	8.88	0.0004	0.191	–
Family	Random	74	30014.6	502.00	3944.8	7.61	0.0001	0.387	0.578
Fluoride concentrations, ln									
Litter size	Fixed	1	1.23	3.11	1.65	0.74	0.4495	–	–
Group	Fixed	1	930.99	60.23	0.40	2303.05	0.0001	–	–
Sex	Fixed	1	0.35	256.84	0.08	4.34	0.0382	–	–
Strain	Random	2	2.24	73.16	0.30	7.36	0.0012	0.147	–
Family	Random	74	0.29	502.00	0.05	6.17	0.0001	0.356	0.503

Table 4

Coefficient of the intrastrain and intrafamily correlation of weight parameters and fluoride concentration in the control group animals ($n = 166, 23$ families)

Source of variance	Effect			Residue		F	p ≤	R	Σ R
	Type	df	MS	df	MS				
Body weight									
Litter size	Fixed	1	336.72	2.84	98.14	3.43	0.1661	–	–
Sex	Fixed	1	50.20	34.79	3.73	13.46	0.0008	–	–
Strain	Random	2	110.97	18.89	14.49	7.66	0.0037	0.382	–
Family	Random	19	14.29	142.00	2.47	5.79	0.0000	0.257	0.639
Femur weight									
Litter size	Fixed	1	592832.7	3.25	152397.5	3.89	0.1359	–	–
Sex	Fixed	1	13392.2	47.63	6616.1	2.02	0.1613	–	–
Strain	Random	2	160684.2	18.91	29738.9	5.40	0.0139	0.302	–
Family	Random	19	29331.8	142.00	4503.3	6.51	0.0000	0.314	0.616
Fluoride concentrations (ln)									
Litter size	Fixed	1	0.02	5.97	0.064	0.35	0.5755	–	–
Sex	Fixed	1	0.18	157.62	0.03	5.20	0.0239	–	–
Strain	Random	2	0.04	18.62	0.05	0.70	0.5073	0.000	–
Family	Random	19	0.05	142.00	0.03	1.59	0.0666	0.080	0.080

significant while it exceeds 60 % for the weight parameters (Table 4, Fig. 3a).

Partly, the obtained results in the control group could be explained by the insignificance of the fluctuations in the background level of the fluoride content in one and the same medium (maternal body – at the antenatal stage, food stuffs and water – at the late stages of the

ontogenesis). Because of this we do not detect (register) the effect of “strain” and “family” of an animal on the fluoride deposition.

However, one could not exclude a somewhat different mechanism for the formation of the fluoride background level in the bone. In this regard a comparative family study of the fluoride deposition in the control group at the stage of late

Table 5

Coefficient of the intrastrain and intrafamily correlation of weight parameters and fluoride concentration in experimental animals ($n = 416, 56$ families)

Source of variance	Effect			Residue		F	p ≤	R	Σ R
	Type	df	MS	df	MS				
Body weight									
Litter size	Fixed	1	799.97	7.87	32.27	24.79	0.0011	–	–
Sex	Fixed	1	168.31	156.51	4.24	39.72	0.0000	–	–
Strain	Random	2	28.47	51.19	16,59	1.72	0.1900	0.029	–
Family	Random	52	15.79	359.00	2.21	7.15	0.0000	0.445	0.445
Femur weight									
Litter size	Fixed	1	183167.6	2.94	153052.9	1.20	0.3554	–	–
Sex	Fixed	1	42541.0	59.98	8075.1	5.27	0.0252	–	–
Strain	Random	2	226023.0	51.17	27366.1	8.26	0.0008	0.229	–
Family	Random	52	26050.5	359.00	3734.5	6.98	0.0000	0.348	0.577
Fluoride concentrations, ln									
Litter size	Fixed	1	5.89	2.61	2.40	2.46	0.2283	–	–
Sex	Fixed	1	0.21	44.24	0.11	1.97	0.1675	–	–
Strain	Random	2	3.76	50.96	0.31	12.13	0.0000	0.288	–
Family	Random	52	0.30	359.00	0.05	5.56	0.0000	0.275	0.563

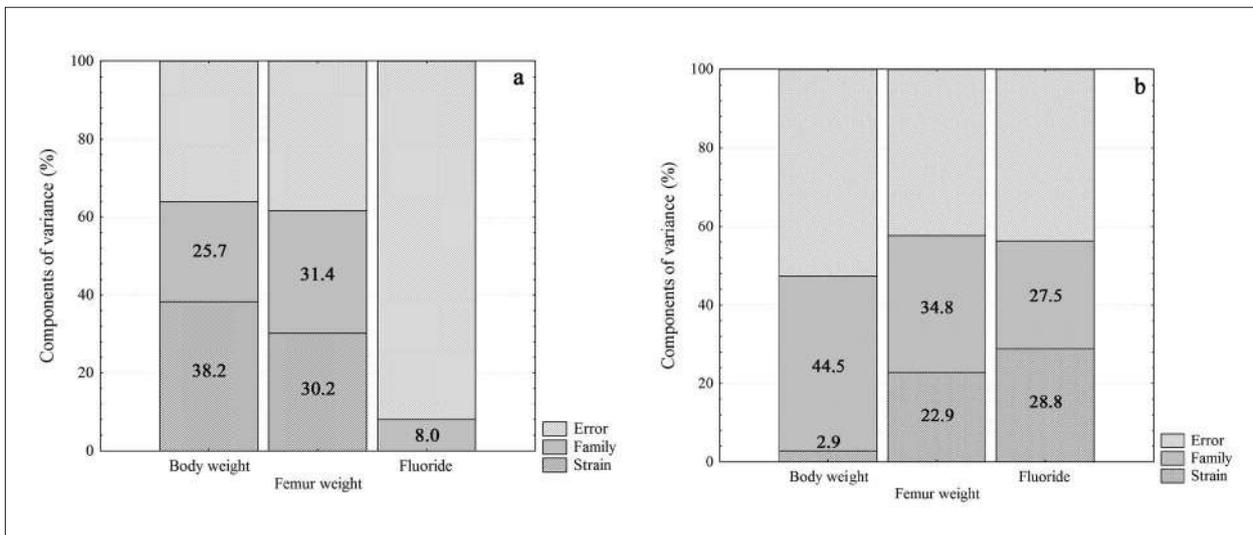


Fig. 3. Dispersion components (%) of the weight and fluoride concentration values, dependent on the strain and family of the animals in the control (a) and experimental (b) groups

antenatal and early postnatal development (until the transition to self-feeding) as well as finding the correlation between the level of the fluoride deposition in the maternal body and litter size will be of interest in the future.

The value of the hereditary dependence of the fluoride accumulation when the analysis performed only in the experimental group is 56.3 % (Table 5, Fig. 3b). The effect of the factor “strain” increases in 2 times relative to the combined sample against the background of some decrease in the effect of the factor “family” (Table 6). Total hereditary component of the dispersion is 56.3 and 50.3 %, respectively.

In the published papers there are few data on the hereditary dependence of the fluoride accumulation. For example, J.G. Carvalho et al. [39] studied the fluoride accumulation in the A/J and 129P3/J mice. Although the consumption of the fluoride by both of the strains was similar, its clearance in A/J mice was much higher. It led to much lower levels of the fluoride in the femur. 129P3/J strain retains more fluoride in the bone. In spite of this, 129P3/J is more resistant to the development of the teeth fluorosis [17].

Comparative analysis of the A/J, 129P3/J and SWR/J strains [8] showed both the presence of the inter-strain differences in its accumulation

Coefficient of the intrastrain and intrafamily correlation of fluoride concentration in experimental animals with different variants of the analysis

Source of variance	Analyzed group		
	Control ($n = 166$)	Experimental ($n = 416$)	Control + Experimental ($n = 578$)
Strain	0.00 ($p = 0.35$)	0.308 ($p < 0.001$)	0.165 ($p < 0.001$)
Family	0.08 ($p = 0.07$)	0.386 ($p < 0.001$)	0.417 ($p < 0.001$)
Strain	0.00 ($p = 0.51$)	0.288 ($p < 0.001$)	0.147 ($p < 0.001$)
Family	0.08 ($p = 0.07$)	0.275 ($p < 0.001$)	0.356 ($p < 0.001$)
ΣR	0.08	0.563	0.503

in the femur and vertebra, and their absence (depending on the level of the fluoride receipts).

High intrafamily correlation ($R = 0.50$) was observed also for the ^{90}Sr deposition in CBA mice in the experiment with single administration of the ^{90}Sr [20]. The correlation value is little changed under the influence of the external factors modifying the growth processes in the skeleton [21].

The fact of the interfamily variability for the inbred animals, previously considered genetically homogeneous, can now be explained by proven non-isogeneity of strains, i.e. genetic variations within inbred mouse strains. Lead to this could be explained both by the residual heterogeneity of the individuals within the strains (spontaneous mutations, breeding errors, random crossing, etc.), and epigenetic variability [40–42].

Epigenetic character of the family component of the fluoride accumulation is related to the fact [43], that genetically homogeneous animals differ only in maternal food ration during pregnancy and lactation. There are no factors other than gestation and milk from different mothers that distinguish mice of the same litter from litters of the same strain kept under the same conditions that lead to different accumulations of fluoride and ^{90}Sr . The epigenetic nature of the inheritance of the deposition of these substances is also evidenced by literature data [44, 45].

The influence of the family is described in the studies of the ^{90}Sr accumulation in individual litters of beagle dogs [46]. The authors have noted that when puppies from one and the same litter have been taking ^{90}Sr with food for a long time, the curves of radionuclide accumulation are parallel. This situation is indirectly confirmed by a set of scientific papers on the food ration effect on the epigenetic labels [47, 48].

Family dependence of the ^{90}Sr accumulation was also found in animals from the natural habitat located in radioactively-contaminated territory of the East Ural Radioactive Trace –

northern mole voles (*Ellobius talpinus* Pallas, 1770) – a specialized vole species living under the ground and characterized by family organization of the settlements and low ability to settle apart [49].

Thus, for the first time with the use of strain and family analysis of the litter of the three strains of the laboratory mice, the hereditary component of the variability (intrastrain and intrafamily, mainly epigenetic) of fluoride accumulation was evaluated. Hereditary dependence of fluoride accumulation was demonstrated. It is comparable to the variability in weight values that are most determined in vertebrates.

The obtained data could be both of fundamental and applied nature in particular for the ecology, health physics and toxicology. The finding of the mechanisms of individual specific features of the skeleton metabolism development will promote the improvement of the predictions of the accumulation and clearance of the bone-seeking pollutant. Quantitative data on the hereditary determination of fluoride metabolism obtained in the laboratory experiment will be extrapolated to natural animal populations living in contaminated areas.

Conclusions

1. The hereditary component of the variability (intrastrain and intrafamily correlation) of the fluoride accumulation in bones under background and chronic receipts of the toxicant (during the whole gestation period of female mice and up to the age of 1.5 month of the progeny) was assessed in the litter of three laboratory mice strains (BALB/c, CBA and BC).

2. In parallel the hereditary component of the variability of morphological characteristics (body weight and femur weight) with known hereditary dependence was evaluated. The assessment was performed with the control of animals' sex, conditions of the toxicant receipts as well as of the litter size in each family.

3. A significant hereditary (intrastrain and intrafamily) correlation of the fluoride accumulation in the bone tissue was found ($R = 0.503-0.563$, $p < 0.0001$), which was comparable to the correlation of the morphological characteristics ($R = 0.445-0.578$, $p < 0.0001$). It is indicative of the hereditary dependence of the fluoride accumulation.

4. Notably, the analysis of the total sample (control and experimental groups) has revealed that relative family component exceeds in 2–3 times the effect of animals' strain (correlation coefficient is 0.4–0.5 and 0.1–0.3 respectively, $p < 0.0001$) both for the fluoride concentration and morphological characteristics. The value of strain and family effect evens up in the analysis of the group that received increased amount of the fluoride. Under the background level of the fluoride receipts, its hereditary component is insignificant.

5. This study should be considered as materials for a biological basis for extrapolation to natural populations of vertebrates.

The author is grateful to I.A. Kshnyasev for his help in the statistical data processing and to N.M. Lyubashevsky – for fruitful discussion of the results.

This study was performed within the frameworks of state contract of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (project No. 122021000077–6).

References

1. Faccini J.M. Fluoride and bone // *Calcif. Tissue Res.* 1969. V. 3. P. 1–16. doi: 10.1007/BF02058641
2. Knizhnikov V.A. Calcium and fluoride: radiation-hygienic aspects. Moskva: Atomizdat, 1975. 199 p. (in Russian).
3. Fluorine and fluorides. Environmental Health Criteria 36. Geneva: WHO, 1984. 100 p.
4. Boivin G., Meunier P.J. Fluoride and bone: Toxic effects and therapeutic role // *Therapeutic uses of trace elements* / Eds. J. Nève, P. Chappuis, M. Lamand. Boston, MA: Springer, 1996. P. 283–295. doi: 10.1007/978-1-4899-0167-5_49
5. Lyubashevskiy N.M., Tokar V.I., Shcherbakov S.V. Technogenic environmental pollution by fluoride (ecological and medical-social aspects). Yekaterinburg: Ural Branch of the RAS, 1996. 239 p. (in Russian).
6. Whitford G.M. The metabolism and toxicity of fluoride // *Monogr. Oral Sci.* 1996. V. 16. 156 p. doi: 10.1159/isbn.978-3-318-04022-7
7. Toxicological profile for fluorides, hydrogen fluoride, and fluorine. Atlanta, GA: Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US), 2003. 404 p.
8. Mousny M., Banse X., Wise L., Everett E.T., Hancock R., Vieth R., Devogelaer J.P., Grynepas M.D. The genetic influence on bone susceptibility to fluoride // *Bone.* 2006. V. 39. No. 6. P. 1283–1289. doi: 10.1016/j.bone.2006.06.006
9. Yanin E.P. Fluoride in the environment: (prevalence, behavior, technogenic pollution) // *Ecological expertise.* 2007. No. 4. P. 2–98 (in Russian).
10. Gornostaeva E.A., Fuks S.L. The effect of fluorinated compounds on living organisms (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2017. No. 1. P. 14–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-014-024
11. WHO. The public health impact of chemicals: knowns and unknowns WHO. International Programme on Chemical Safety. Geneva, 2016. 16 p.
12. Mogilenkova L.A., Rembovskiy V.R. Role of genetic polymorphism and differences in the detoxification of chemical substances in the human body // *Hygiene & Sanitation.* 2016. V. 95. No. 3. P. 255–262 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2016-95-3-255-262
13. Polzik E.V., Valova G.A., Zinger V.E., Sysoeva L.A. Some problems of biomedical prophylaxis occupational fluorosis // *Occupational medicine and industrial ecology.* 1995. V. 5. P. 44–47 (in Russian).
14. Lavryashina M.B., Ul'ianova M.V., Druzhinin V.G., Tolochko T.A. A study of the genetic basis of susceptibility to occupational fluorosis in aluminum industry workers of Siberia // *Russ. J. Genet.* 2003. V. 39. No. 7. P. 823–827.
15. Bol'shakov V.N., Vasil'ev A.G., Vasil'eva I.A., Gorodilova Yu.V., Kolcheva N.E., Lyubashevskii N.M., Chibiriyak M.B. Technogenic morphological variation of the pygmy wood mouse (*Sylvaemus uralensis* Pall.) in the Urals // *Russ. J. Ecol.* 2012. V. 43. No. 6. P. 448–453. doi: 10.1134/S1067413612060033
16. Lyubashevsky N.M., Emelyanov A.M., Bakhtiyarova M.F., Juraev M.I., Kotomtsev V.V., Mokronosov A.A., Portnaya L.V., Chibiriyak M.V., Starichenko V.I. Prospects for animal husbandry in the TADAZ area // *Recommendations of the scientific and practical conference on reviewing the status of the results of the implementation of the "Target scientific and technical program of work to reduce emissions of pollutants into the environment by the Tajik Aluminum Plant to maximum permissible levels"*. Tursunzade, 1991. P. 84–90 (in Russian).
17. Everett E.T., McHenry M.A.K., Reynolds N., Eggertsson H., Sullivan J., Kantmann C., Martinez-Mier E.A., Warrick J.M., Stookey G.K. Dental fluorosis: variability among different inbred mouse strains // *J. Dent. Res.* 2002. V. 81. No. 11. P. 794–798. doi: 10.1177/0810794
18. Yan D., Willett T.L., Gu X.M., Martinez-Mier E.A., Sardone L., McShane L., Grynepas M., Everett E.T. Phenotypic variation of fluoride responses between inbred strains of mice // *Cells Tissues Organs.* 2011. V. 194. No. 2–4. P. 261–267. doi: 10.1159/000324224
19. Vogel F., Motulsky A.G. Human genetics: problems and approaches. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 981 p.

20. Starichenko V.I. Metabolism of osteotropic toxic substances: hereditary determination // *Ecol. Genet.* 2010. V. 8. No. 3. P. 27–37 (in Russian).
21. Starichenko V.I. Hereditary component of variation in ⁹⁰Sr deposition in inbred mice under exogenous conditions that affect bone formation // *Appl. Radiat. Isot.* 2018. V. 140. P. 126–132. doi: 10.1016/j.apradiso.2018.07.006
22. Everett E.T. Fluoride's effects on the formation of teeth and bones, and the influence of genetics // *J. Dent. Res.* 2011. V. 90. No. 5. P. 552–560. doi: 10.1177/0022034510384626
23. National Research Council (US) Committee for the Update of the Guide for the Care and Use of Laboratory Animals. Guide for the care and use of laboratory animals. Washington, D.C.: National Academies Press, 2011. 246 p.
24. Leary S., Underwood W., Anthony R., Cartner S., Corey D., Grandin T., Greenacre C., Gwaltney-Brant S., McCrackin M., Meyer R., Miller D., Shearer J., Yanong R., Golab G., Patterson-Kane E. AVMA guidelines for the euthanasia of animals: 2013 edition // *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 2013. 402 p.
25. Khazemova L.A., Radovskaya T.L., Kruglova N.V., Kachalkova T.K. Fluorine assessment in plant material // *Agrokhimiya.* 1983. No. 6. P. 66–72 (in Russian).
26. Mather K., Jinks J.L. Introduction to biometrical genetics. London: Chapman and Hall Ltd., 1982. 238 p.
27. Falconer D.S., Mackay T.F.C. Introduction to quantitative genetics. Essex: Longman House, 1996. 448 p.
28. Beamer W.G., Donahue L.R., Rosen C.J., Baylink D.J. Genetic variability in adult bone density among inbred strains of mice // *Bone.* 1996. V. 18. No. 5. P. 397–403. doi: 10.1016/8756-3282(96)00047-6
29. Slemenda C.W., Turner C.H., Peacock M., Christian J.C., Sorbel J., Hui S.L., Johnston C.C. The genetics of proximal femur geometry, distribution of bone mass and bone mineral density // *Osteoporos. Int.* 1996. V. 6. No. 2. P. 178–182. doi: 10.1007/BF01623944
30. Scheffé H. The analysis of variance. New York: Wiley, 1959. 496 p.
31. Sokal R.R., Rohlf F.J. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. New York: W.H. Freeman & Co., 1995. 887 p.
32. Gabovich R.D. Fluoride and its hygienic value. Moscow: Medgiz, 1957. 250 p. (in Russian).
33. ICRP Publication 20. Alkaline earth metabolism in adult man. Oxford: Pergamon Press, 1973. 99 p.
34. Hefti A., Marthaler T.M. Bone fluoride concentrations after 16 years of drinking water fluoridation // *Caries Res.* 1981. V. 15. No. 1. P. 85–89. doi: 10.1159/000260504
35. Il'enko A.I., Krapivko T.P. Animal ecology in the radiation biogeocoenose. Moskva: Nauka, 1989. 224 p. (in Russian).
36. Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O. Improvements in the biokinetic model for strontium with allowance for age and gender differences in bone mineral metabolism // *Radiat. Prot. Dosimetry.* 2003. V. 105. No. 1–4. P. 619–622. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006314
37. Fluoride concentrations in human bones // *Nutr. Rev.* 1959. V. 17. No. 5. P. 133–136. doi: 10.1111/j.1753-4887.1959.tb06433.x
38. Pharmacology of fluorides / Ed. F.A. Smith // *Handbuch der experimentellen Pharmakologie.* V. 20. Pt. 2. Berlin, Heidelberg, New York: Springer; Verlag, 1966. 452 p. doi: 10.1007/978-3-642-99973-4
39. Carvalho J.G., Leite A.L., Yan D., Everett E.T., Whitford I.G.M., Buzalaf M.A.R. Influence of genetic background on fluoride metabolism in mice // *J. Dent. Res.* 2009. V. 88. No. 11. P. 1054–1058. doi: 10.1177/0022034509347249
40. Vasil'ev A.G. Epigenetic bases of phenetics: towards population meronomy. Ekaterinburg: Akademkniga, 2005. 640 p. (in Russian).
41. Casellas J. Inbred mouse strains and genetic stability: a review // *Animal.* 2011. V. 5. No. 1. P. 1–7. doi: 10.1017/S1751731110001667
42. Chebib J., Jackson B.C., López-Cortegano E., Tautz D., Keightley P.D. Inbred lab mice are not isogenic: genetic variation within inbred strains used to infer the mutation rate per nucleotide site // *Heredity.* 2021. V. 126. No. 1. P. 107–116. doi: 10.1038/s41437-020-00361-1
43. Lyubashevsky N.M., Starichenko V.I. Lactation and the phenomenon of biodiversity (epigenetics of the mineral metabolism of rodents) // *Genetics of Populations: Progress and Perspectives: Proceedings of the International Conference commemorating the 80th birthday of Academician Y.P. Altukhov.* Zvenigorod, April 17–21, 2017. Moskva, 2017. P. 152–154 (in Russian).
44. Kitsiou-Tzeli S., Tzetis M. Maternal epigenetics and fetal and neonatal growth // *Curr. Opin. Endocrinol. Diabetes Obes.* 2017. V. 24. No. 1. P. 43–46. doi: 10.1097/MED.0000000000000305
45. Ge Z.J., Sun Q.Y. Maternal epigenetic inheritance // *Transgenerational Epigenetics.* 2019. V. 13. P. 75–105. doi: 10.1016/B978-0-12-816363-4.00005-5
46. Goldman M., Della Rosa R.J. Studies of the dynamics of strontium metabolism under conditions of continual ingestion to maturity // *Strontium metabolism: proceedings of an International symposium on some aspects of strontium metabolism / Eds. J.M.A. Lenihan, J.F. Loutit, J., G. Martin.* London, New York: Academic Press, 1967. P. 181–194.
47. Jang H., Serra C. Nutrition, epigenetics, and diseases // *Clin. Nutr. Res.* 2014. V. 3. No. 1. P. 1–8. doi: 10.7762/cnr.2014.3.1.1
48. Murdoch B.M., Murdoch G.K., Greenwood S., McKay S. Nutritional influence on epigenetic marks and effect on livestock production // *Front. Genet.* 2016. V. 7. Article No. 182. doi: 10.3389/fgene.2016.00182
49. Starichenko V.I. Accumulation of ⁹⁰Sr in the bone tissue of northern mole voles in the head portion of the East Ural Radioactive Trace // *Russ. J. Ecol.* 2011. V. 42. No. 1. P. 64–70. doi: 10.1134/S1067413611010115

**Параметры осенней миграционной остановки
молодых зябликов (*Fringilla coelebs* Linnaeus, 1758)
в восточной части Русской равнины**

© 2026. Г. Л. Накул, к. б. н., н. с.,
Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: nakul@ib.komisc.ru

За пятилетний период осуществлён отлов молодых зябликов с целью определения параметров их миграционной остановки (сроки и динамика пролёта, длительность миграционной остановки, линька в процессе миграции и скорость жиронакопления птиц во время миграционной остановки) в условиях таёжной зоны на востоке Русской равнины. Были проанализированы данные первичных отловов 416 птиц, из которых повторно было отловлено 20 особей. Средняя длительность миграционной остановки для молодых зябликов составила 1 день. В первые сутки птицы теряют около 5 % от среднего значения массы тела, но в последующие дни происходит восстановление потерь. Более длительные остановки значительно выгодней для молодых птиц, поскольку позволяют им увеличить запасы «топлива» и повысить шансы благополучно провести следующий миграционный бросок. Остаётся открытым вопрос, насколько оптимальны экологические условия миграционных остановок в речных долинах на востоке Русской равнины.

Ключевые слова: *Fringilla coelebs* L., осенняя миграция, миграционная остановка, скорость жиронакопления.

**Parameters of autumn migratory stopover
of young chaffinches (*Fringilla coelebs* Linnaeus, 1758)
in the Eastern Russian Plain**

© 2026. G. L. Nakul ORCID: 0000-0001-9643-5663
Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: nakul@ib.komisc.ru

Over a five-year period, young chaffinches were captured to determine the parameters of their migratory stopover (timing and dynamics of flight, duration of migratory stopover, molting during migration, and the rate of birds' fat accumulation during migratory stopover) in the taiga zone in the Eastern Russian Plain. The data from the 416 birds' initial captures were analyzed, only 20 individuals of which were recaptured. The average migratory stopover for young chaffinches lasted 1 day. During the first day the birds lose about 5 % of their average body weight, but in the following days, the losses are restored. The behavioral strategy of young chaffinches at migratory stopovers in the Eastern Russian Plain coincides with the general behavioral strategy of many passerines, regardless of the continent and species. This species is characterized by a combination of post-juvenile molting and autumn migration, which reduces the rate of fat accumulation, but does not prevent an increase in body weight due to other types of tissue. The combination of two costly physiological processes occurs in conditions where the species does not need to make long migration and overcome extensive ecological barriers, and as a result, chaffinches make minimal migratory stopovers. Longer stopovers are much more beneficial for young birds, since they allow them to increase their "fuel" reserves and increase their chances of successfully completing the next migration.

Keywords: *Fringilla coelebs* L., autumn migration, migratory stopover, rate of fat accumulation.

Миграция птиц – это их перемещение из мест размножения к местам зимовок, включающее в себя миграционные остановки [1].

На остановках птицы тратят почти 90 % времени миграции и 2/3 своих энергетических миграционных затрат [1–3]. Исследование

особенностей миграционных остановок стало важным элементом в изучении проблем миграции [1, 2], поскольку качество местообитаний и их количество на миграционном пути может играть ключевую роль в динамике популяции в дальнейшем [4]. Выбор оптимальной стратегии поведения на маршрутах, остановках, а также адаптационная гибкость птиц к местным условиям играют решающую роль для минимизации риска смерти и поддержания определённого физиологического состояния организма вне периода размножения [5]. Параметры миграционной остановки включают в себя такие элементы как продолжительность остановки во времени, скорость изменения массы мигрирующей птицы на остановке и взаимозависимость указанных параметров [4]. Наибольший интерес представляет процесс изменения массы и жирности тела птицы в период миграции [6], поскольку может характеризовать важность остановки на момент миграции и влиять на скорость дальнейшего пролёта особи [7]. Динамика мышечной массы редко изучалась у воробьиных видов птиц в местах, которые не находятся в непосредственной близости к экологическим барьерам [8]. Таким образом, для понимания адаптации птиц на местах остановок во время всего пути миграции необходим подробный анализ внутривидовых различий и особенностей путей совершенствования адаптивных свойств вида в меняющихся условиях на путях пролёта.

Зяблик *Fringilla coelebs* один из самых многочисленных и распространённых гнездящихся видов Европы [9–13], численность которого к началу двадцать первого века насчитывала от 83 до 240 млн пар [14]. На территории Европейской части России миграция вида подробно изучена в её западных регионах, охватывающих Ленинградскую [15–17] и Калининградскую области [18–23]. В этих работах подробно рассмотрены сроки пролёта, скорость миграционного движения, особенности физиологического состояния зябликов в период миграции. В восточной части Русской равнины подобные исследования по зябликам не проводились.

Целью настоящего исследования является определение основных параметров миграционной остановки молодых зябликов в условиях долин таёжных рек на востоке Русской равнины.

Материал и методы исследований

Район исследований. В основу работы положены результаты отловов птиц в до-

лине среднего течения р. Сысолы, которая определена как ключевая орнитологическая территория международного значения для многих гнездящихся и мигрирующих птиц [24]. Бассейн этой реки расположен в северо-восточной части восточно-европейской равнины, примерно в 450 км к западу от северного Урала в подзоне средней тайги. Река протекает с юга на север и является одним из главных притоков р. Вычегды, которая входит в речной бассейн Северной Двины. Птиц отлавливали в с. Межадор (61°08'37.05" с. ш. 50°19'52.38" в. д.). Территория отловов характеризуется высоким разнообразием биотопов: сенокосные луга и ивовые заросли граничат с крапивными пустошами, зарослями борщевика Сосновского, частными картофельными огородами, зарослями плодово-ягодных кустарников и деревьями (берёза, черёмуха, сосна обыкновенная), как отдельно стоящими, так и растущими группами. Эти условия являются благоприятными как для насекомоядных птиц, так и для видов, питающихся ягодами и семенами различных культурных и диких растений.

Материал и методы отлова. Материал собран в августе-сентябре 2015–2017 гг. и в сентябре 2019 г. в долине среднего течения р. Сысолы (Республика Коми). Всего проанализировано 416 особей зябликов, из них повторно пойманы 20 птиц, что составило 5 % от общего объёма отловленных особей. Отлов проведён стандартными паутиными сетями длиной 5–12 м, общая протяжённость которых составила 120 м. Сети расставляли в местах концентрации птиц. Проверка сетей проходила ежедневно в светлое время суток с интервалом в 1–2 ч. Ночью птицы в сети не попадались. Стадии линьки описаны по схеме, принятой для зябликов [25]. Массу тела измеряли электронными весами (МН-696, Китай, 0,01–600 г) с точностью до 0,01 г. Для расчётов продолжительности миграционной остановки зябликов использованы данные по времени поимки птиц, начиная с первой миграционной волны (табл. 1). Для исключения местных птиц из выборок для анализа скорости жиронакопления вошли данные особей, которые впервые были отловлены ближе к медианной дате миграции и имели стадию линьки не ниже четвертой.

Методы анализа данных. Для каждого параметра (длина крыла, начальная и конечная масса тела, начальная и конечная жирность) рассчитывали среднюю и стандартную ошибку. Для оценки значимости различий

Таблица 1 / Table 1

Динамика осенней миграции молодых зябликов / Dynamics of chaffinch autumn migrations

Год исследования Research year	Даты миграционных волн / The dates of migration waves			Медиана пролёта Median migration
	первая / the 1st	вторая / the 2nd	третья / the 3d	
2015	07.09–10.09	15.09–17.09	–	9.09
2016	29.08–1.09	07.09–09.09	14.09–16.09	31.08
2017	22.08–03.09	12.09–14.09	19.09–22.09	24.08
2019	8.09–13.09	16.09–18.09	24.09–27.09	16.09

Примечание: прочерк означает отсутствие миграционной волны (массового пролёта в этот период).
Note: a dash means the absence of a migration wave (mass migration during this period).

между выборками использовали непараметрический критерий Манна–Уитни (значение «z») при $p < 0,05$. Длительность миграционной остановки определяли на основе средних минимальных промежутков между повторными отловами (разницу между датами первого и последнего отловов). Оценку продолжительности миграционных остановок рассчитывали на основе данных мечения – повторного отлова, используя стохастические модели Кормака–Джолли–Себера [26, 27]. Эти модели позволяют оценить вероятность присутствия особи на миграционной остановке в день i , а также вероятность того, что она всё ещё будет присутствовать в день $i+1$ [28, 29]. Среднее значение продолжительности остановок (SL) определяли по формуле:

$$SL = \frac{-1}{\ln Ph},$$

где Ph – сохраняемость птицы на остановке [28].

Данные анализировали с помощью пакета MARK 8.2 [30]. Для ранжирования моделей использовали информационный индекс Акайки [31]. Соответствие моделей данным оценивали с помощью программы RELEASE, имеющейся в пакете MARK 8.2.

Моделирование изменения массы тела и степени жирности у мигрантов на остановках оценивали методом множественной пошаговой регрессии. В исходную модель были включены следующие факторы: начальная масса тела, дата начального отлова, посуточное изменение массы тела птицы, а также изменение массы тела в течение суток [32]. Корреляционные связи по Спирмену установлены для непараметрических данных (включённые факторы в модель) обоих выборок. В выборку по расчёту изменения массы через одни сутки входили птицы, которых повторно отлавливали на следующий день после начального отлова. Для анализа второй выборки птиц отбирали данные повторных отловов тех особей, которые попадали в сети повторно через двое и более

суток. В расчёт не вошли данные по изменению массы особей, которые были отловлены в первый день вечером и на следующий день ранним утром, чтобы избежать заниженных результатов ночных потерь масс тела птицы. Для расчёта всех упомянутых коэффициентов использовали программные пакеты Statistica 6.0, Past 3.13 и Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Динамика пролёта и продолжительность остановки. Медиана пролёта молодых птиц сильно менялась по годам (табл. 1). Различия в медианах самок и самцов были недостоверны ($z = -1,18, p = 0,2$). Длительность миграционной остановки вида в целом составила одни сутки (данные не состоятельны по программе Release). Показатель среднего интервала между половозрастными группами имел крайне малые недостоверные различия и в целом соответствовал общему показателю для вида. Максимальный интервал между первым и последним отловом составлял 8 дней, а в среднем $3,17 \pm 0,74$ дня ($n = 18$). У молодых самцов средний интервал был больше и составил $3,63 \pm 1,07$ дня ($n = 8$), наибольший – 8 дней. У молодых самок отмечен наименьший интервал между отловами, который в среднем составил $1,33 \pm 0,33$ дня ($n = 3$). Различия между полами в интервалах отлова недостоверны ($z = -1,41, p = 0,2$).

Анализ продолжительности остановки на основе моделей мечения-повторного отлова показал несостоятельность полученных результатов в связи с недостаточностью данных (малое количество индивидуальных историй) по повторным отловам (показатель программы Release), доля которых составила менее 1 % от первичных отловов зябликов. Тем не менее, было выявлено, что $\Phi(i)p(i)$ является наилучшей моделью (табл. 2). Высокая сохраняемость птиц наблюдается в первую ночь, а более низкая – в последующие дни (табл. 2). В данной модели вероятность присутствия

Таблица 2 / Table 2

Сравнение моделей, описывающих структуру варьирования повседневной сохраняемости и вероятности отлова молодых зябликов во время осенней миграции / Comparison of models describing the structure of variation in daily survival rate and the probability of chaffinch catching during autumn migration

Модель Model	AICc	ΔAICc	Вес модели Model weight	Число параметров Number of parameters	Отклонение от данных Deviation from data
Phi(.)p(.)	289,1456	0,0000	0,99834	2	19,2352
Phi(.)p(t)	302,1919	13,0463	0,00147	12	11,5717
Phi(t)p(.)	306,2325	17,0869	0,0019	12	15,6112
Phi(t)p(t)	314,9585	25,8129	0,00000	19	9,2489

Примечание: (.) – параметр постоянный; (t) – параметр зависит от времени (отдельное значение для каждого дня); AICc – значение информационного критерия Акайки; ΔAICc – отклонение этого значения у каждой модели от значения лучшей модели.

Note: (.) – constant parameter; (t) – parameter depends on time (separate value for each day); AICc is the value of the Akaiki information criterion; ΔAICc is the deviation of this value for each model from the value of the best model.

Таблица 3 / Table 3

Доля птиц в отловах по стадиям линьки, % / Birds' proportion in catches by molting stages, %

Волна миграции Migration wave	Стадии линьки / Molting stages								
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	Полная Full moult
Первая / The 1 st	0,05	0,05	0,14	0,21	0,24	0,14	0,07	0,07	0,02
Вторая / The 2 nd	0,01	0,03	0,05	0,16	0,14	0,20	0,15	0,17	0,10
Третья / The 3 ^d	–	–	0,06	0,19	0,09	0,20	0,26	0,11	0,09

Примечание: прочерк означает отсутствие особей на стадии линьки.

Note: a dash means no molting birds.

птиц в популяции на миграционной остановке и вероятность их отлова постоянны и не зависят от времени, прошедшего с момента мечения. Во второй модели отмечена постоянность для сохраняемости, но вероятность отлова уже зависит от времени. Таким образом, показатель вероятности присутствия птицы на остановке в последующие дни остаётся на прежнем уровне в течении всего миграционного периода.

Совмещение линьки и миграции. У зябликов по мере развития миграционного пролёта через стационар наблюдается изменение доли птиц на разных стадиях линьки (табл. 3). В первую, самую мощную волну пролёта, преобладают птицы на 4 и 5 стадиях линьки. В следующую волну увеличивается доля птиц на 6 стадии, и в завершающие этапы пролёта больше всего в сети попадали зяблики на 6 и 7 стадии линьки. Также стоит отметить возрастание в пять раз доли полностью перелинявших птиц, однако они не преобладали в отловах ни в одну из волн пролёта.

Скорость жиронакопления. Для молодых птиц, отловленных через сутки после первого отлова, значимых связей с факторами не выявлено. Обнаружена значимая корреля-

ционная связь в группе птиц, которые отлавливались повторно через двое и более суток, между конечной и исходной массой тела (табл. 4). Анализ расчётов множественной линейной регрессии показал, что в этой группе птиц масса тела накапливается быстрее (рис. 1). Однако регрессионная связь была незначительна.

Большинство птиц, повторно отловленных через сутки, теряло в массе, и в среднем эти потери составили $1,15 \pm 0,50$ г (5 % от средней массы тела при $n = 6$) (рис. 2). Потери массы, по сравнению с номинальной массой тела при первом отлове, также были отмечены на вторые ($1,19 \pm 0,50$ г или 5 %, при $n = 3$) и третьи сутки ($0,72$ г или 3 %, при $n = 1$). Прирост массы тела наблюдался у птиц, пойманных на шестые ($0,9 \pm 0,9$ г или 4 %, при $n = 2$) и восьмые сутки ($0,69 \pm 0,20$ г или 3 % от средней массы тела, при $n = 3$). В итоге среднее изменение массы тела через первые сутки было отрицательным и составило $-1,16 \pm 0,53$ ($n = 6$), а в последующие дни положительным – $0,37 \pm 0,33$ ($n = 10$). При продолжительности остановки в 2 дня, прирост массы тела в сутки для остановившихся птиц составил $0,16$ г или 0,7 % от средней массы тела зяблика.

В течение суток снижение массы тела отмечено в послеполуденные часы (между 14 и 15 часами дня), а повышение – между 18 и 19 часами дня. До сумерек масса тела, как правило, выравнивалась относительно утренних

измерений. Общий тренд изменения массы был положительным (рис. 3).

Сроки миграции и длительность миграционной остановки. Зяблики, несмотря на растянутый миграционный сезон (птицы

Таблица 4 / Table 4

Корреляция конечного уровня массы тела молодых зябликов с различными факторами
Correlation of final body mass level of juvenile chaffinch with various factors

Фактор Factor	Коэффициент корреляции Correlation coefficient		Уровень значимости Level of significance		Стандартная ошибка Standard error	
	r_1	r_2	p_1	p_2	Sr_1	Sr_2
$m_{\text{исходная}} / \text{initial}$	0,58	0,65	0,13	0,02	0,33	0,24
Δm	0,57	0,71	0,14	0,009	0,33	0,22
$f_{\text{исходная}} / \text{initial}$	-0,06	-0,31	0,89	0,31	0,41	0,30
$f_{\text{конечная}} / \text{final}$	0,29	0,22	0,49	0,49	0,39	0,31
Δf	0,52	0,31	0,19	0,37	0,35	0,30
Дата / Date	0,08	0,48	0,85	0,11	0,41	0,28

Примечание: r_1 – коэффициент корреляции особей, переловленных через сутки после первого отлова ($n = 8$), r_2 – коэффициент корреляции птиц, отловленных на вторые и следующие сутки ($n = 12$); p_1 – уровень значимости особей, переловленных через сутки после первого отлова, p_2 – уровень значимости птиц, отловленных на вторые и следующие сутки; Δm – разница между исходной и конечной массой, Δf – разница между исходным и конечным уровнем жирности, жирным шрифтом отмечены значимые корреляции.

Note: r_1 is the correlation coefficient of individuals recaptured a day after the first capture ($n = 8$), r_2 is the correlation coefficient of birds captured on the second and subsequent days ($n = 12$), p_1 is the significance level of individuals recaptured a day after the first capture, p_2 is the significance level of birds captured on the second and subsequent days, Δm is the difference between the initial and the final weight, Δf is the difference between the initial and final fat content; significant correlations are marked in bold.

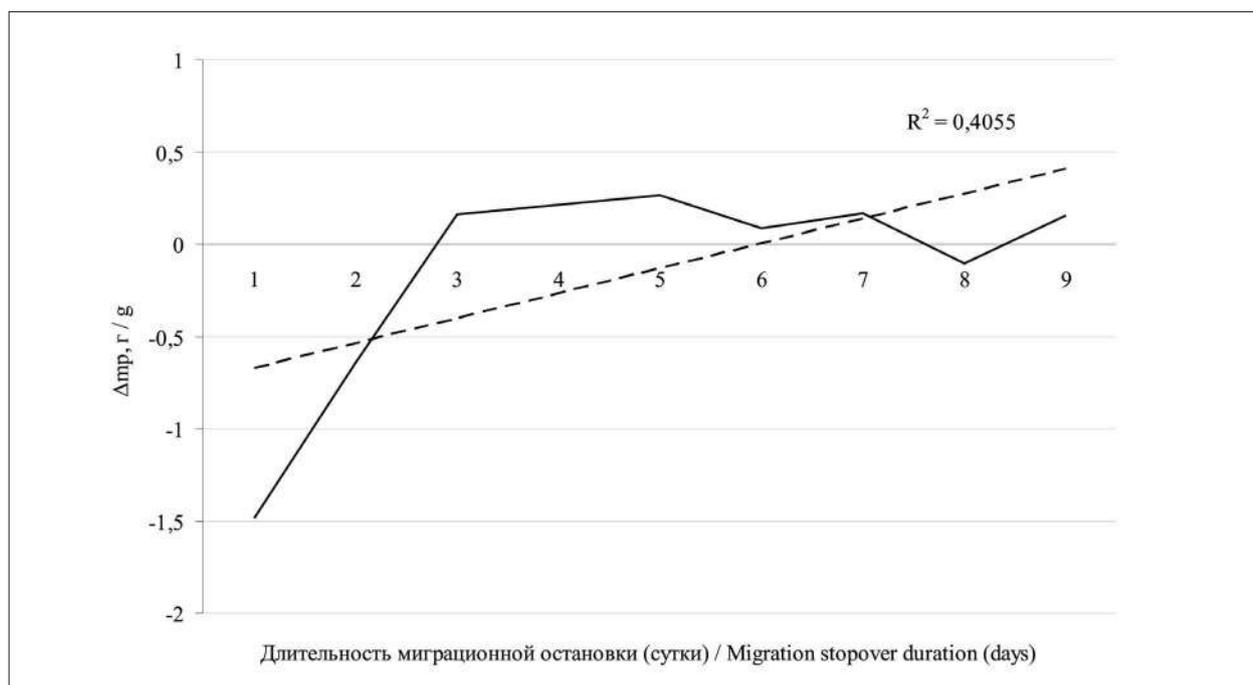


Рис. 1. Расчётная модель жиронакопления молодых зябликов в течение миграционной остановки. Сплошная линия (Δm_p) – расчётное изменение массы тела (г), накопленной за период остановки; пунктир – линия тренда
Fig. 1. Calculation model of chaffinch fat accumulation during the migratory stopover. Solid line (Δm_p) is the calculated change in the chaffinch body weight (g), accumulated during the stop; the dashed line is the trend

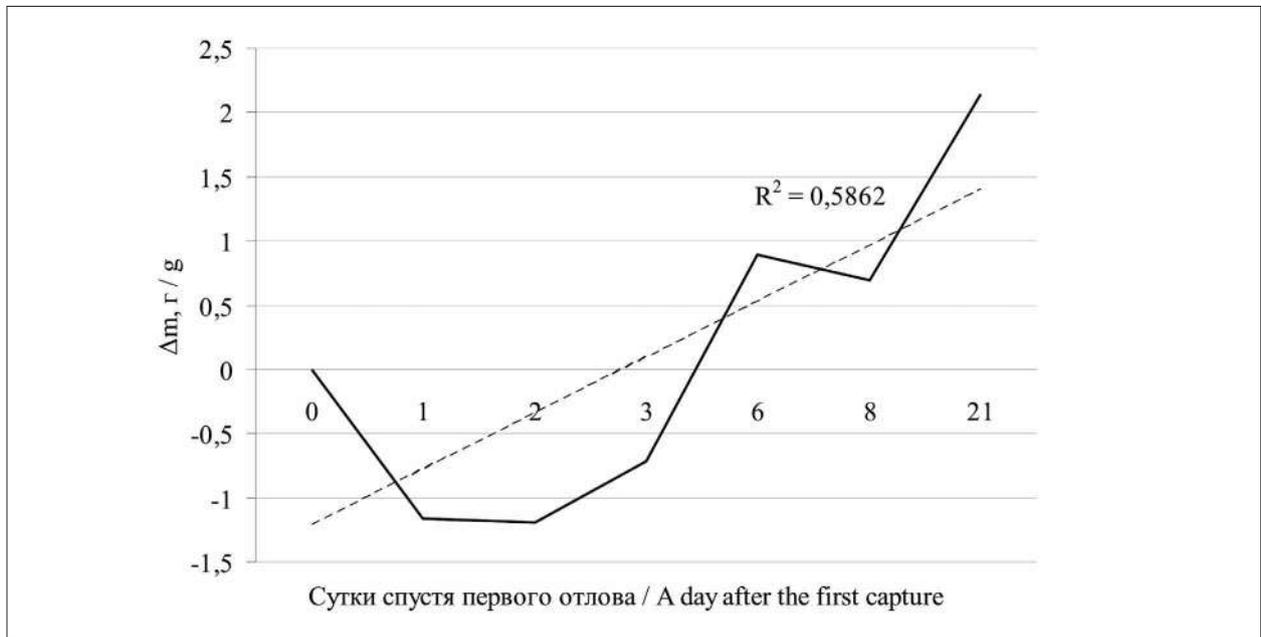


Рис. 2. Динамика изменения массы тела зябликов на миграционной остановке (n = 12).
 Сплошная линия (Δm) – разница между первым и последним взвешиванием тела птицы (г),
 пунктир – линия тренда
Fig. 2. Chaffinch body weight changes dynamics at a migratory stopover (n = 12).
 Solid line (Δm) is the difference between the first and last weighing (g); the dashed line is the trend

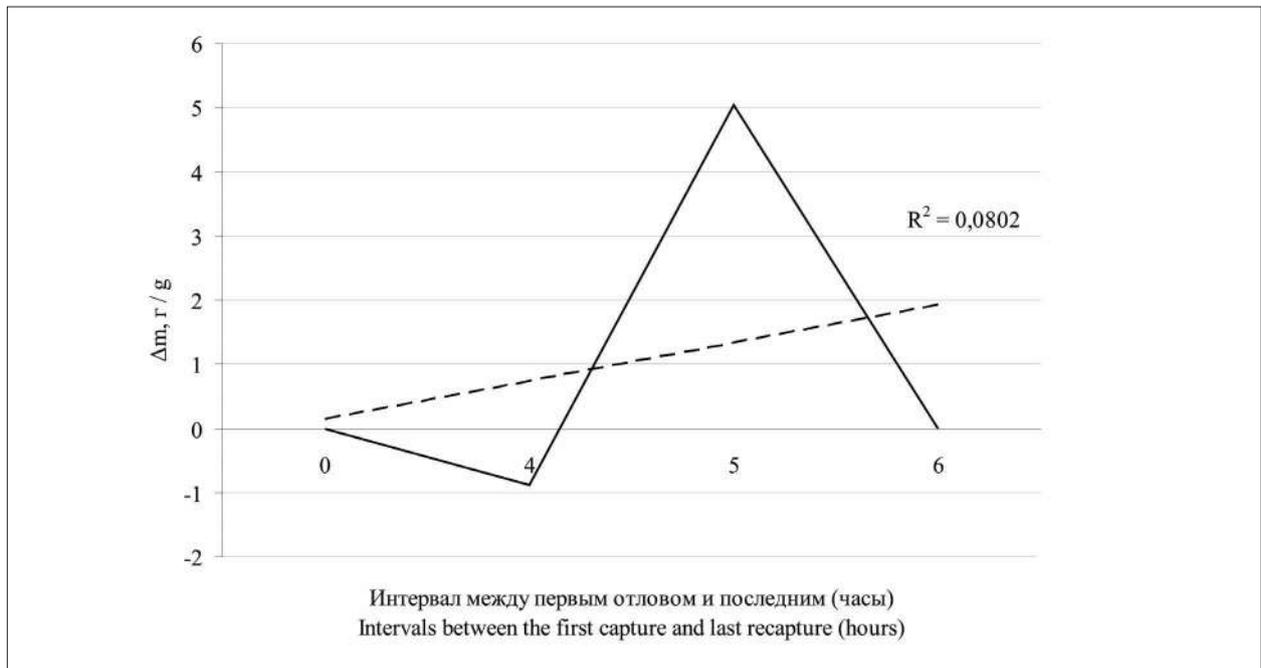


Рис. 3. Динамика массы тела в течение суток у зябликов. Сплошная линия (Δm) – разница между первым и последним взвешиванием тела птицы (г), пунктир – линия тренда
Fig. 3. Dynamics of chaffinch body weight during the day.
 Solid line (Δm) is the difference between the first and last weighing (g); the dashed line is the trend

встречались до начала ноября), имели раннюю медиану прилёта, которая приходится на первую декаду сентября. В других регионах, например, на Ладужской орнитологической станции массовый пролёт по многолетним данным приходится на вторую декаду сентября, в Карелии (66° с. ш.) молодые зяблики летят массово в середине сентября, а на Куршской косе для вида обозначена граница миграционного сезона между началом сентября и серединой ноября [33, 34]. В таёжной зоне Западной Сибири, в бассейне р. Томь (Кемеровская область) на 54° с. ш., сроки пролёта зябликов и время их массовой миграции [35, 36] практически совпадают с датами пролёта зябликов на нашем стационаре (61° с. ш.), но отличаются от данных с юга Новосибирской области в устье р. Карган (вторая половина сентября), что находится на 54° с. ш.

Если рассматривать динамику по годам, то сроки миграции могут сильно варьировать, и условия сезона оказывают значительное влияние на ход миграции [33]. Так, в нашем случае необычным был 2017 г., когда медиана пролёта пришлась на 24 августа. В этот год наблюдалась запоздалая весна (майские снегопады, средняя месячная температура воздуха около 0 °С), в связи с чем были сдвинуты сроки гнездования, и, соответственно, последующие жизненные этапы. В результате отмеченный массовый отлов в конце августа пришёлся на отлёт местной популяции, который обычно происходит в начале августа, а массовый пролёт транзитных особей наблюдался в сентябре и октябре. Таким образом, с одной стороны прослеживается влияние фотопериода, характерного для каждой широты, на запуск миграционных процессов, но дальнейший ход миграции испытывает значительное влияние со стороны погодных условий в период пребывания вида в местах размножения. Наиболее точные данные отмечены при многолетних исследованиях, когда редкие погодные аномалии не оказывают столь сильного влияния на статистическую норму пролёта. В данной работе требуются дополнительные данные для уточнения многолетней даты массового пролёта зябликов на исследуемой территории.

Сведений о длительности остановки зяблика крайне мало и их трудно сравнить с другими регионами. Однако результаты, полученные по нашему стационару, свидетельствуют, что птицы в массе редко задерживаются на остановке более двух дней. Несмотря на недостоверность полученных данных при сравнении на основе моделей меченья–по-

вторного отлова, а также учитывая тот факт, что зяблики самый массовый вид в отловах [37], недостаток повторных отловов зябликов на вторые и последующие сутки свидетельствует о коротких миграционных остановках продолжительностью в одни сутки.

Длительность пребывания в местах остановки может быть связана с разными факторами. В литературе значимыми факторами называют качество местообитаний (обилие и доступность корма) и наличие экологического барьера в предстоящий миграционный бросок [38–40]. На исследуемой территории отсутствие экологических барьеров позволяет птицам повысить скорость пролёта без совершения длительных остановок на пути миграции на востоке Русской равнины. Сопоставимые результаты были получены и для других видов воробьиных птиц из иных экологических групп, когда длительность остановки была незначительна [41].

Совмещение линьки с миграцией. Среди изученных видов зяблики осуществляли линьку в течение всего времени пролёта. Им, в силу более раннего начала миграции, приходилось лететь ещё на средних стадиях линьки. Данное обстоятельство является дополнительным фактором для продления времени остановки у некоторых особей, которые имели максимальные сроки между первым и повторным отловом. Родственный зяблику вид – вьюрок также имеет сходную стратегию совмещения линьки с первыми этапами миграции [42]. Этим фактором объясняется более длительная остановка некоторых молодых зябликов с запоздалыми сроками линьки. Этим птицам приходится больше задерживаться на остановке для обеспечения не только энергией для следующего миграционного броска, но и для энергоёмких процессов линьки. Однако, для большинства птиц средние стадии линьки не являются препятствием для продолжения миграции в оптимальных условиях миграционного пути. С каждой последующей волной миграции растёт доля птиц с более поздней стадии линьки, что связано с подлётом особей из северных популяций. При этом доля участия полностью перелинявших птиц в каждой волне сильно не изменяется. Например, на юге Западной Сибири (Новосибирская область) молодые зяблики на пике осеннего пролёта находятся уже на завершающих стадиях постювенальной линьки [43]. С одной стороны, наличие миграционных волн указывает на то, что через стационар идут транзитные особи, но с другой – сохранение доли птиц на средних

стадиях линьки может указывать на включение в пролёт местных птиц с более поздней датой вылупления, либо свидетельствует о том, что северные популяции начинают миграцию на ранних стадиях линьки. Рост в сентябре доли молодых зябликов на последних стадиях линьки явно указывает на прилёт птиц из северных мест размножения. Очень похожая ситуация описана для миграции молодых зябликов в Приладожье [17].

Масса и уровень жировых резервов. За короткую остановку зяблики успевают увеличить массу, при этом скорость накопления была выше в конце миграции. При длительных остановках сохраняется увеличение массы тела, однако уровень жировых резервов снижается, особенно в конце пролёта. При этом была обнаружена отрицательная зависимость изменения массы и жирности от начальных показателей, что характерно практически для многих мигрирующих воробьиных [1, 44, 45]. Исследования мигрирующих птиц Северной Америки на путях пролёта с короткими миграционными бросками и отсутствием экологических барьеров показывает также увеличение массы тела птиц за счёт изменения мышечной массы, а не жировых отложений [8], что объясняет увеличение массы тела зябликов и на исследуемой территории.

Изменения массы в течение остановки имеет тенденцию к увеличению к моменту отлёта. И чем дольше птица остаётся на остановке, тем выше растёт её масса перед миграционным броском. Эта тенденция не линейна и имеет индивидуальные различия в колебаниях массы. Если сравнивать с другими регионами, то, например, в Карелии у молодых варакушек также почти не изменяется масса тела молодых птиц в период остановки [26]. В то же время для птиц в нижнем Приобье характерно увеличение массы тела и жирности в предмиграционный период [42]. Сильные колебания массы тела установлены также для птиц на миграционных остановках в Северной Америке [8, 46]. При этом североамериканские авторы указывают на двухфазную природу динамики массы тела, что согласуется и с нашими данными. Таким образом, можно утверждать, что независимо от места расположения стоянки в широтном и долготном направлении для молодых птиц сохраняется единая модель поведения. Молодые птицы не могут значительно повышать свои жировые резервы перед следующим миграционным броском, но увеличивают свою массу тела за счёт нежировых тканей. При этом известно,

что в оптимальных местообитаниях мигранты накапливают жировые резервы перед преодолением экологических барьеров [27, 38]. В результате прослеживается общий механизм поведения птиц в любых географических точках. Это было хорошо показано на других видах воробьиных птиц в Европе [45], в Африке [47, 48] и Северной Америке [8]. Предложенная модель в этой работе достаточно верно описывает энергетическое поведение птиц на стоянках, и наши результаты, если исключить индивидуальные особенности динамики массы тела, вписываются в эту модель.

При исследовании показано постоянное изменение суточной динамики массы тела молодых зябликов, но общий тренд оказывается положительным к завершению дня. Зависимость тощей массы тела отмечается для мигрирующих воробьиных птиц на остановках в Северной Америке, когда максимальные значения происходят вечером [8, 49]. При индивидуальных наблюдениях за птицами, которые перелавливались от трёх до четырёх раз в сутки, также был показан общий положительный тренд изменения массы тела. Даже при учёте ночных потерь, которые отмечены для исследованного вида, к концу миграционной остановки птица имеет лучшие показатели жирности и массы тела, чем в день прилёта.

Заключение

Таким образом, стратегия поведения молодых зябликов на миграционных остановках на востоке Русской равнины совпадает с общей стратегией поведения многих воробьиных видов птиц, независимо от континента и видовой принадлежности. Для вида характерно совмещение процессов постовенальной линьки и осенней миграции, что снижает скорость жиракопления, но не препятствует увеличению массы тела за счёт других видов тканей. Совмещение двух затратных физиологических процессов происходит в условиях, когда виду не требуется совершать длительные миграционные броски и преодолевать обширные экологические барьеры, а в результате зяблики совершают минимальные миграционные остановки. Лишь небольшая группа молодых птиц остаётся на длительный срок, увеличивая свою массу и повышая шансы на будущий успех своей первой миграции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской

академии наук по теме «Закономерности формирования, пространственно-структурной организации и динамики фауны и населения животных европейского северо-востока России и сопредельных арктических и бореальных территорий в изменяющихся условиях окружающей среды» № 125013101229-9.

References

1. Chernetsov N.S. Migration of passerine birds: stops and flight. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 173 p. (in Russian).
2. Alerstam T., Lindström Å. Optimal bird migration: the relative importance of time, energy, and safety // *Bird Migration* / Ed. E. Gwinner. Berlin, Heidelberg: Springer, 1990. P. 331–351. doi: 10.1007/978-3-642-74542-3_22
3. Wikelski M., Tarlow E.M., Raim A., Diehl R.H., Larkin R.P., Visser G.H. Costs of migration in free-flying songbirds // *Nature*. 2003. V. 423. No. 6941. Article No. 704. doi: 10.1038/423704a
4. Briedis M., Beran V., Hahn St., Adamík P. Annual cycle and migration strategies of a habitat specialist, the Tawny Pipit *Anthus campestris*, revealed by geolocators // *J. Ornithol.* 2016. V. 157. No. 2. P. 619–626. doi: 10.1007/s10336-015-1313-3
5. Alerstam T. Optimal bird migration revisited // *J. Ornithol.* 2011. V. 152. No. 5. P. 5–23. doi: 10.1007/s10336-011-0694-1
6. Ścisłowska M., Busse P. Fat reserves and body mass in some passerines migrating in autumn through the southern Baltic coast // *Ring*. 2005. V. 27. No. 1. P. 3–31. doi: 10.2478/v10050-008-0014-1
7. De Zwaan D.R., Huang A., McCallum Q., Owen K., Lamont M., Easton W. Mass gain and stopover dynamics among migrating songbirds are linked to seasonal, environmental, and life-history effects // *Ornithology*. 2022. V. 139. P. 1–16. doi: 10.1093/ornithology/ukac027
8. Seewagen C.L., Guglielmo C.G. Quantitative magnetic resonance analysis and a morphometric predictive model reveal lean body mass changes in migrating Nearctic–Neotropical passerines // *J. Comp. Physiol. B*. 2011. V. 181. No. 3. P. 413–421. doi: 10.1007/s00360-010-0534-2
9. Malchevskiy A.S., Pukinskiy Yu.B. Birds in the Leningrad Region and adjacent territories. Passerines. Leningrad: Leningrad State University, 1983. V. 2. 504 p. (in Russian).
10. Zimin V.B., Sazonov S.V., Lapshin N.V., Khokhlova T.Yu., Artemyev A.V., Annenkov V.G., Yakovleva M.V. Ornithofauna of Karelia. Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS. 1993. 220 p. (in Russian).
11. Sazonov S.V. The taiga birds in the Belomor-Onega watershed. Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS, 2011. 502 p. (in Russian).
12. Newton I. Chaffinch *Fringilla coelebs* // The new atlas of breeding birds in Britain and Ireland: 1988–1991 / Eds. D.W. Gibbons, J.B. Reid, R.A. Chapman. London: T. & A.D. Poyser, 1993. P. 408–409.
13. Newton I., Väisänen R.A. Chaffinch *Fringilla coelebs* // The EBCC atlas of European breeding birds / Eds. W.J.M. Hagemeijer, M.J. Blair. London: T. & A.D. Poyser, 1997. P. 702–703.
14. European Bird Populations: Estimates and Trends. Birdlife International / Eds. M.F. Heath, C. Borggreve, N. Peet. Cambridge: BirdLife International, 2000. 160 p.
15. Noskov G.A. Chaffinch (*Fringilla coelebs*) molt. Photoperiodic regulation and place in the annual cycle // *Zoologicheskii zhurnal*. 1977. V. 11. No. 56. P. 1676–1686 (in Russian).
16. Noskov G.A., Zimin V.B., Rezyvi S.P., Rymkevich T.A., Lapshin N.V., Golovan V.I. Birds of the Ladoga ornithological station and its environs // *Ecology of birds in the Ladoga region* / Ed. G.A. Noskov. Leningrad: Leningrad State University, 1981. P. 3–86 (in Russian).
17. Noskov G.A., Panov I.N., Rymkevich T.A. Chaffinch (*Fringilla coelebs*) // Bird migration in the North-West Russia. Passeriformes / Eds. G.A. Noskov, T.A. Rymkevich, A.R. Gaginskaya. St. Petersburg: Renome, 2020. P. 365–375.
18. Belopolskiy L.O. Character of autumn migration of passerines on the Curonian Spit according to their capture data in 1957–1964 // *Baltics' bird migrations: Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*. 1967. V. 40. P. 56–86 (in Russian).
19. Blumenthal T.I. Changes in energy reserves (fat content) in some passerine birds of the Curonian Spit in connection with their participation in migration // *Baltics' bird migrations: Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*. 1967. V. 40. P. 164–202 (in Russian).
20. Blumenthal T.I. Formation of autumn migration status in nature in some passerine birds (bioenergetic aspect) // *Ecological and physiological aspects of bird migration: Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*. 1971. V. 50. P. 111–182 (in Russian).
21. Mezheny A.A. Some features of bird migration on the Curonian Spit based on visual observations in 1959–1960 // *Baltics' bird migrations: Trudy Zoologicheskogo instituta AN SSSR*. 1967. V. 40. P. 3–25 (in Russian).
22. Paevsky V.A. The speed of autumn migration of the chaffinch (*Fringilla coelebs* L.) in Europe based on the results of ringing in the eastern Baltic // *Proceedings of the Zoological Institute RAS*. 2010. V. 314. No. 1. P. 58–66 (in Russian).
23. Sokolov L.V., Markovets M.Yu., Morozov Yu.G. Long-term dynamics of the mean date of autumn migration in passerines on the Courish Spit of the Baltic Sea // *Avian Ecol. Behav.* 1999. V. 2. P. 1–18.
24. Anufriev V.M., Kochanov S.K. Komi Republic // *Key ornithological territories of Russia*. V. 1. Key ornithological territories of international importance in Euro-

pean Russia / Eds. T.V. Sviridova, V.A. Zubakin. Moskva: Russian Birds' Conservation Union, 2000. P. 82–88 (in Russian).

25. Noskov G.A. Chaffinch – *Fringilla coelebs* L. // Molting of passerine birds in the USSR northwest / Ed. T.A. Rymkevich. Leningrad: Leningrad State University Publ., 1990. P. 202–208 (in Russian).

26. Panov I.N., Chernetsov N.S. Migration strategy of the bluethroats, *Luscinia svecica*, in Eastern Fennoscandia. Part 1: Main stopover parameters // Proceedings of the Zoological Institute RAS. 2010. V. 314. No. 1. P. 93–104 (in Russian). doi: 10.31610/trudyzin/2010.314.1.93

27. Chernetsov N.S., Bulyuk V.N., Ktitorov P.S. Role of the Dzhanibek oasis as a migratory stopover site for forest passerines // Povolzhskiy Journal of Ecology. 2010. No. 2. P. 204–216 (in Russian).

28. Titov N.V., Chernetsov N.S. Stochastic models as a new method for assessing the duration of migratory stops of birds // Advances in current biology. 1999. V. 119. No. 4. P. 396–403 (in Russian).

29. Chernetsov N.S. Stopover ecology and behavior of passerine migrants: methodological issues of studies // Ornithologia. 2003. V. 30. P. 136–146 (in Russian).

30. White G.C., Burnham K.P. Program MARK: survival estimation from populations of marked animals // Bird Study. 1999. V. 46. Suppl. P. 120–139. doi: 10.1080/00063659909477239

31. Burnham K.P., Anderson D.R. Model selection and inference: a practical information-theoretic approach. New York: Springer, 1998. 353 p. doi: 10.1007/978-1-4757-2917-7

32. Schaub M., Jenni L. Stopover durations of three warbler species along their autumn migration route // Oecologia. 2001. V. 128. No. 2. P. 217–227. doi: 10.1007/s004420100654

33. Panov I.V. Overlap between moult and autumn migration in passerines in northern taiga zone of Eastern Fennoscandia // Avian Ecol. Behav. 2011. V. 19. P. 33–64.

34. Bird migration in the North-West Russia. Passeriformes / Eds. G.A. Noskov, T.A. Rymkevich, A.R. Gagin-skaya. St. Petersburg: Renome, 2020. 530 p. (in Russian).

35. Kovalevsky A.V., Pyashenko V.B. Sequence of flight of young and adult birds during autumn migration of various perching birds groups // Bulletin of KemSU. 2012. No. 3. P. 11–16 (in Russian).

36. Kovalevsky A.V., Ilyashenko V.B. Materials on the autumn migration of small passerine birds in the valley of the middle reaches of the Tom River // Materials on the bird distributions in the Urals, Priuralye and Western Siberia. No. 15 / Eds. V.K. Ryabitsev, V.V. Tarasov. Ekaterinburg: Ural State University Publ., 2010. P. 75–87 (in Russian).

37. Nakul G.L. On the autumn migration of passerine birds in the Sysola River valley in 2015–2017 // Russian Ornithological Journal. 2018. V. 27. P. 5287–5299 (in Russian).

38. Ktitorov P., Tsvey A., Mukhin A. The good and the bad stopover: behaviours of migrant reed warblers at two contrasting sites // Behav. Ecol. Sociobiol. 2010. V. 64. P. 1135–1143. doi: 10.1007/s00265-010-0929-9

39. Lindström Á. Fuel deposition rates in migrating birds: causes, constraints and consequences // Avian migration / Eds. P. Berthold, E. Gwinner, E. Sonnenschein. Berlin: Springer, 2003. P. 307–320.

40. Bayly N.J., Rosenberg K.V., Gómez C., Hobson K.A. Habitat choice shapes the spring stopover behaviour of a Nearctic–Neotropical migratory songbird // J. Ornithol. 2019. V. 160. P. 377–388. doi: 10.1007/s10336-019-01624-3

41. Nakul G.L. Parameters of the autumn migration stopover of young bluethroats (*Luscinia svecica* Linnaeus, 1758) in the conditions of the middle taiga in the eastern Russian Plain // Contemporary Problems of Ecology. 2024. V. 31. No. 1. P. 41–51 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20240104

42. Ryzhanovsky V.N. Ecology and annual cycle of the brambling *Fringilla montifringilla* in the Low Ob region. 2. Postbreeding and winter periods // Russian Ornithological Journal. 2010. V. 19. No. 590. P. 1431–1446 (in Russian).

43. Chernyshov V.M. Seasonal migrations of finches Fringillidae in the south of Western Siberia // Russian Ornithological Journal. 2012. V. 21. No. 774. P. 1595–1600 (in Russian).

44. Chernetsov N., Titov N. Migratory stopovers of juvenile Blackcaps *Sylvia atricapilla* in autumn: stopover length, fuel deposition rate, and an attempt to predict departure body mass // Avian Ecol. Behav. 2001. V. 6. P. 27–28.

45. Schaub M., Jenni L. Body-mass of six long-distance migrant passerine species along the autumn migration route // J. Ornithol. 2000. V. 141. P. 441–460. doi: 10.1007/BF01651574

46. Carpenter F.L., Hixon M.A., Russel R.W., Patton D.C., Temeles E.J. Interference asymmetries among age-classes of rufous hummingbirds during migratory stopover // Behav. Ecol. Sociobiol. 1993. V. 33. No. 5. P. 297–304. doi: 10.1007/BF00172927

47. Karasov W.H., Pinshow B. Changes in lean mass and in organs of nutrient assimilation in a long-distance passerine migrant at a springtime stopover site // Physiol Zool. 1998. V. 71. P. 435–448. doi: 10.1086/515428

48. Bauchinger U., Wohlmann A., Biebach H. Flexible remodeling of organ size during spring migration of the garden warbler (*Sylvia borin*) // Zoology (Jena). 2005. V. 108. No. 2. P. 97–106. doi: 10.1016/j.zool.2005.03.003

49. Marsh R.L. Adaptations of the Gray Catbird *Dumetella carolinensis* to long distance migration: energy stores and substrate concentrations in plasma // Auk. 1983. V. 100. No. 1. P. 170–179. doi: 10.1093/auk/100.1.170

Эктомикоризные симбионты и морфо-анатомическое строение корневых окончаний *Pinus sylvestris* L. на вырубках сосняка черничного средней тайги Республики Коми

© 2026. Т. А. Сизоненко, к. б. н., н. с.,

Д. М. Шадрин, к. б. н., с. н. с.,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: tvor.83@mail.ru

Исследованы особенности микоризообразования сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на вырубках сосняка черничного средней тайги (вырубка 2008 г., вырубка 2015 г.). Получены данные по морфологии и анатомии эктомикориз, проведена молекулярная идентификация грибных симбионтов. Методом световой микроскопии обнаружено 10 подтипов грибных чехлов, встречаемость и богатство которых менялось в зависимости от возраста вырубки. Различия в количественных показателях эктомикоризных корней, как правило, были достоверны. В контрольном сосняке показатели, характеризующие состояние растительного компонента симбиоза (диаметр эктомикориз и собственно корня, проводящего цилиндра) были достоверно выше по сравнению с вырубкой 2008 г., а показатели, характеризующие грибной компонент (толщина и объёмная доля грибного чехла, плотность эктомикориз), наоборот, ниже. Для 42 из 70 отобранных образцов удалось выделить ДНК грибов, провести амплификацию и секвенирование ITS-региона. Из всех идентифицированных таксонов, достоверно относящихся к микоризообразователям, 15 видов из пяти семейств относятся к отделу Basidiomycota и один вид *Cenococcum geophilum* принадлежит отделу Ascomycota. Два вида – *Tylospora fibrillosa* и *Cenococcum geophilum* – встречались на всех исследованных участках. Наибольшим разнообразием грибов-микоризообразователей и подтипов грибных чехлов характеризовалась вырубка 2008 г. Наибольшей встречаемостью на всех участках характеризовались виды семейства Russulaceae.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., вырубки, эктомикориза, морфо-анатомическая структура, микобионты.

Ectomycorrhizal symbionts and morpho-anatomical structure of *Pinus sylvestris* L. fine roots in clear-cuts of blueberry pine forests, middle taiga, the Komi Republic

© 2026. Т. А. Sizonenko ORCID: 0000-0001-8184-4018[†]D. M. Shadrin ORCID: 0000-0003-4365-0145[†]

Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: tvor.83@mail.ru

We studied the features of mycorrhiza formation in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the 2008 and 2015 years clear-cuts of the blueberry pine forest of the middle taiga. The data on the morphology, anatomy of ectomycorrhizae, and molecular identification of fungal symbionts were obtained. Using light microscopy we detected 10 subtypes of fungal mantles, the occurrence and richness of which varied across community types and sampling years. Differences in quantitative parameters of the ectomycorrhizal roots were reliable in most cases. At the control site, the parameters characterizing the plant symbiotic component (ectomycorrhizae diameter, root diameter, and stele diameter) were significantly higher than at the nine years clear-cuts. At the same time, parameters of the fungal component (thickness and volume fraction of the fungal mantel, ectomycorrhizae density) were higher at the clear-cuts. For 42 of the 70 samples, we successfully performed fungal DNA isolation, amplification and ITS-region sequencing. Totally we identified 15 mycorrhizal fungi species from five families belonging to the Basidiomycota, and one species of *Cenococcum geophilum* belonged to the Ascomycota. Two species, *Tylospora fibrillosa* and *Cenococcum geophilum*, occurred at all study sites. A high occurrence was also found for *Suillus variegatus*, which forms tuberculated well-recognised pine ectomycorrhizae.

The greatest diversity of mycorrhizal fungi isolated from pine roots and fungal mantel subtypes was found at the 2008 clear-cut. The species most frequently encountered in all study sites were those of the *Russulaceae* family. The blueberry pine forest and the 2008 clear-cut were the most similar in species composition.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., clear-cuttings, ectomycorrhiza, morpho-anatomical structure, mycobionts.

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) является одной из главных лесообразующих пород Европейского северо-востока России и произрастает практически по всей территории Республики Коми [1]. Сосна способна формировать древостой в самых разных условиях: и на бедных песчаных почвах, и в условиях олиготрофного заболачивания, в том числе благодаря хорошо развитой многоярусной корневой системе, распространяющейся на большие расстояния в горизонтальном и вертикальном направлениях [2–4]. Способность этого вида расти в экстремальных условиях связывают с его высокой микотрофностью и связью с более чем 200 видами грибов-микоризообразователей [5–9].

Рубки леса приводят к механическим нарушениям напочвенного покрова, подстилок и верхних горизонтов почвы, их уплотнению, изменению состава и количества растительных остатков и опада, трансформации режимов света, тепла, осадков и функционирования микробных комплексов в целом [10, 14]. По некоторым данным [12], в условиях севера флористический состав нарушенного лесного сообщества не восстанавливается спустя длительное время после антропогенного воздействия. Особенно при вырубках лесов разрушаются сообщества эктомикоризных грибов [5, 13–15], поскольку они зависят от получения углерода от деревьев-симбионтов [16, 17]. В условиях северных хвойных лесов в течение как минимум 15 лет после вырубки сохраняется нарушение микробных сообществ почв [18]. Показано, что биомасса почвенного мицелия *Boletus edulis* Bull., являющегося симбионтом *P. sylvestris*, не восстанавливается и через три года после рубки деревьев сосны [19]. В послерубочных сообществах происходят различные перестройки состава и обилия грибов-микоризообразователей [5]. Например, умеренное прореживание деревьев приводит к увеличению плодовых тел некоторых видов грибов, например, *Lactarius* spp. [20, 24].

Известно, что морфо-анатомические параметры корней отражают физиологическое состояние растения, а разнообразие и структура грибных чехлов в эктомикоризах являются косвенными индикаторами разнообразия микобионтов [22–26].

Цель работы – охарактеризовать микотрофность сосны обыкновенной, включая параметры морфо-анатомической структуры микоризных корневых окончаний сосны обыкновенной и определение в них микобионтов на вырубках сосняка черничного средней тайги.

Объекты и методы исследования

Работа выполнена в сосняке черничном (61°35'35" с. ш., 51°02'25" в. д.) и на вырубках сосняка черничного, проведенных в 2008 г. и 2015 г. Тип рубки – сплошная. В качестве контроля выбран спелый сосняк черничный, произрастающий рядом с вырубкой. Почва – торфянисто-подзолисто-глееватая иллювиально-железистая, песчаная, подстилаемая с глубины 60 см суглинками [27, 28].

В июле 2019 г. были отобраны образцы корней с лесной подстилкой размером 10×10 см глубиной 10 см. Отобранные образцы хранили в холодильнике в полиэтиленовых пакетах при температуре +4 °С и анализировали не более 10 суток. Участки отбора проб были приурочены к разновозрастным деревьям сосны. Всего было отобрано по 25–30 почвенных проб на одном участке в один период времени. Корни очищали и отмывали в воде. Разделение микоризных окончаний на морфотипы производили с использованием бинокля на основании характера ветвления, цвета и формы окончаний, наличия ризоморф или свободного мицелия. Всего в ходе полевых работ было отобрано 70 образцов микоризных корневых окончаний. Отдельные микоризные окончания каждого морфотипа помещали в 1,5-миллилитровые пробирки с буфером (на основе реагента 2 % СТАВ) для стабилизации материала, хранения и последующего выделения ДНК.

Тотальная ДНК грибов была выделена с помощью набора «Quiagen» (Германия) согласно инструкциям производителя. Выделенную ДНК хранили при температуре –20 °С. Амплификацию фрагмента проводили в реакционной смеси объемом 25 мкл, содержащей 5 мкл ScreenMix («Евроген», Россия), 5 мкл каждого праймера (0,3 мкМ) («Евроген», Россия), 9,0 мкл воды без нуклеаз («Am-

bion», США) и 1,0 мкл геномной ДНК (1÷100 нг). Для амплификации фрагмента ITS1-5.8S-ITS2 использовали праймеры itsOF-T 5'-ACTTGGTCATTTAGAGGAAGT-3' в комбинации с универсальным для грибов праймером ITS-4 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3', со специфичным для базидиомицетов праймером ITS4B 5'-CAGGAGACTTGTACACGGTCCAG-3'. Амплификацию проводили в термоциклере Swift MiniPro («ESCO», Сингапур) по следующей схеме: предварительная денатурация – 5 мин при 95 °С; 35 циклов: денатурация – 30 с при 94 °С, отжиг – 30 с при 59 °С, элонгация – 40 с при 72 °С; и финальная элонгация – 2 мин при 72 °С. Продукты реакции амплификации разделяли методом электрофореза в 1,3 % агарозном геле в 1× триацетатном буферном растворе, окрашивали бромистым этидием, для визуализации использовали трансиллюминатор UVT-1 («Биоком», Москва). В качестве маркера длины фрагментов ДНК использовали 100 bp Ladder DNA marker (100 bp-1500 bp) (Евроген, Россия). Для очистки полученного продукта использовали набор QIAquick Gel Extraction Kit (Qiagen, Германия). Количество выделенной ДНК и ПЦР-продукта определяли на анализаторе жидкости «Флюорат-02-Панорама» (ООО «Люмэкс», Россия). Секвенирование проводилось с использованием набора реагентов ABI Prism BigDye Terminator v. 1,1 на приборе ABI PRISM 310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems, США) на базе ЦКП «Молекулярная биология» Института биологии Коми НЦ УрО РАН.

Идентификацию таксонов эктомикоризных грибов, выделенных из микоризных окончаний до видового уровня, проводили с использованием BlastN алгоритма сравнения гомологичных последовательностей с ресурсами доступных баз данных GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>). При определении границ изучаемых таксонов мы опирались на установленный для ITS грибов нижний порог, равный 97–98 % [29, 30]. Полученные последовательности были депонированы в GenBank.

Микроморфологическое строение эктомикориз изучали на поперечных срезах толщиной 8–10 мкм, которые готовили на вибрационном микротоме для мягких тканей [31]. Из одного случайно отобранного в пробе эктомикоризного окончания готовили один поперечный срез. Всего был просмотрен 301 анатомический срез эктомикориз. Анатомические срезы, помещённые в глицерин, просматривали при

помощи микроскопа Axiovert 200 M (Carl Zeiss, Германия). Для качественного и количественного анализа морфо-анатомического строения эктомикориз использовали методику из работы [32], согласно которой у каждого окончания фиксировали толщину грибного чехла, количество таниновых клеток в коре корня, радиус эктомикоризы, наличие внутриклеточных образований. Долю грибного чехла в эктомикоризе рассчитывали по формуле:

$$d = (r_1^2 - r_2^2) / r_1^2 \cdot 100\%,$$

где d – доля грибного чехла на площади поперечного среза корня, r_1 – общий радиус корневого окончания с мицелиальным чехлом, r_2 – радиус собственно корня.

Подтип грибного чехла определяли, используя таблицу из работы [33]. Выделяли два основных типа грибных чехлов: плектенхиматические, где визуально можно увидеть отдельные гифы, и псевдопаренхиматические, напоминающие обычную растительную паренхиму, где гифы выглядят округлыми, укороченными и компактными [34]. В случае одновременного наличия плектенхиматических и псевдопаренхиматических участков, чехлы классифицировались как двойные. К бесструктурным относили чехлы, в которых отсутствовала чёткая структура мицелиальной ткани [33].

Статистическую обработку данных проводили, используя пакет программ Microsoft Excel 2003, STATISTICA 10. В таблицах и рисунках указаны средние арифметические значения и стандартные ошибки. Для оценки различий между сообществами применяли однофакторный ANOVA (F-критерий), t-критерий Стьюдента для независимых выборок.

Результаты и обсуждение

Общие закономерности микоризации корней сосны. Изучение особенностей морфо-анатомического строения тонких корней позволяет оценивать физиологическое состояние микоризных окончаний и состояние эктомикоризного симбиоза в целом. Интенсивность микоризации поглощающих корней сосны в изучаемых сообществах варьировала от 93 до 100 % (табл. 1). Длина эктомикориз изменялась от 2 до 4,8 мм.

Контрольный сосняк отличался от вырубок более высокими показателями диаметра эктомикориз, корней, длины корней. Однако,

Таблица 1 / Table 1
Количественные показатели строения эктомикориз сосны в исследуемых сообществах и достоверность их различий
Quantitative indicators of pine ectomycorrhizae structure in the studied communities and the reliability of their differences

Тип место-обитания Habitat type	Плотность эктомикориз, шт/40 см Ectomycorrhizae density, pcs/40 cm	Доля немикоризных корней, % Non-mycorrhizal roots, %	Длина эктомикориз, мм Ectomycorrhizae length, mm	Доля окончаний с утерянным тургором, % Roots with lost turgor, %	Встречаемость таниновых клеток в коровой паренхиме, % Occurrence of tannin cells in cortex, %	Диаметр эктомикориз, мкм Ectomycorrhizae diameter, μm	Диаметр собствен-ного корня, мкм Root diameter, μm	Диаметр стебля, мкм Stele diameter, μm	Толщина грибоного чехла, мкм Fungal mantle thickness, μm	Доля объёма грибоного чехла, % Volume of the fungal mantle, %
Контроль Control	57,6 ± 4,1	5,0	4,8 ± 0,3	16,8	44,1 ± 2,7	413,5 ± 11,4	380,1 ± 10,4	194,4 ± 7,1	16,7 ± 0,9	15,3 ± 0,7
Вырубка 2008 г. Clear-cut of 2008	63,2 ± 7,3	7,0	2,0 ± 0,2*	26,7*	44,7 ± 2,7	381,0 ± 8,7*	334,4 ± 8,2*	176,3 ± 5,3*	23,3 ± 1,0*	23,1 ± 0,9*
Вырубка 2015 г. Clear-cut of 2015	59,4 ± 2,5	0	4,7 ± 0,2	3,0*	26,3 ± 1,3*	406,0 ± 7,3*	370,7 ± 6,9	137,4 ± 4,6*	17,7 ± 0,6	16,7 ± 0,5
Различия между сообществами** Differences between communities**	$F(2, 43) = 0,4$ $p = 0,7$	–	$F(2, 149) = 58,9$ $p < 0,001$	–	$F(2, 298) = 19,9$ $p < 0,001$	$F(2, 298) = 3,5$ $p = 0,03$	$F(2, 298) = 8,1$ $p < 0,001$	$F(2, 298) = 25,4$ $p < 0,001$	$F(2, 298) = 17,0$ $p < 0,001$	$F(2, 298) = 32,5$ $p < 0,001$

Примечание: * различия достоверны при $p < 0,05$ при использовании t -критерия Стьюдента между контролем и вырубкой; ** результаты дисперсионного анализа по однофакторной ANOVA. Прочерк обозначает отсутствие расчётов по однофакторной ANOVA.

Note: * differences are significant at $p < 0.05$ using Student's t -test between control and clear-cutting; ** results by one-way ANOVA. A dash denotes the absence of calculations by one-factor ANOVA.

толщина и объёмная доля грибного чехла в эктомикоризах сосны в данном сообществе были ниже, чем на вырубках (табл. 2).

Вырубка 2008 г. характеризовалась наибольшей плотностью микоризных корневых окончаний (табл. 1), наблюдалась тенденция снижения диаметра эктомикоризных корневых окончаний и повышения толщины и объёмной доли грибного чехла. По-видимому, все перечисленные характеристики отражают компенсаторные механизмы сосны к сложившимся в сообществе условиям, поскольку эктомикоризы достаточно чувствительны к изменениям среды [35] (табл. 1). Согласно предыдущим исследованиям [35], грибной компонент эктомикориз обычно более пластичен по сравнению с растительным, поскольку зависит от большего числа факторов.

К показателям, отражающим возрастные изменения в тонких корнях и их «жизненную активность», относятся количество таниновых клеток, а также число эктомикориз с утерянным тургором [35]. Их количество было наибольшим на вырубке 2008 г. по сравнению с другими площадками.

В целом, можно отметить, что в контрольном сосняке показатели, характеризующие состояние растительного компонента симбиоза (диаметр эктомикориз и собственно корня, проводящего цилиндра), были достоверно выше, чем на вырубках. Параметры, характеризующие грибной компонент (толщина и объёмная доля грибного чехла, плотность эктомикориз), уменьшались на вырубках (табл. 1). Данный факт интересен, поскольку подтверждает, что изучаемые сукцессионные сообщества находятся ещё в стадии своего становления и баланс обоих симбионтов, по-видимому, пока не достигнут.

Состояние грибных чехлов корневых окончаний сосны. Микроморфологическое и анатомическое разнообразие эктомикориз является следствием разнообразия грибов-микоризообразователей [33, 34, 26]. Следовательно, разнообразие и структура наборов типов грибных чехлов являются показателями, отражающими особенности видового разнообразия микобионтов конкретного вида растения [22, 25, 32]. Микоризы с чехлами разного сложения имеют разный уровень физиологической активности. Известно, что плектенхиматические чехлы являются наиболее молодыми, псевдопаренхиматические и двойные – более зрелые и физиологически активные, бесструктурные грибные чехлы характерны для завершающей стадии разви-

тия корневых окончаний [24, 34, 36]. Также известно, что разные виды грибов формируют грибные чехлы разной толщины. Например, наиболее тонкие чехлы формируют грибы родов *Amphinema*, *Dermocybe*, *Hebeloma* и *Tricholoma*, а толстые – *Boletus*, *Xerocomus*, *Rhizopogon*, *Suillus*, *Lactarius*, *Paxillus* и *Russula* [37].

Всего на изучаемых площадках было отмечено 10 подтипов грибных чехлов (табл. 2). В контрольном сосняке выявлено семь подтипов грибных чехлов, а наибольшим разнообразием характеризовалась вырубка 2008 г., где обнаружено десять подтипов грибных чехлов. Состав грибных чехлов сосны обыкновенной на исследуемой территории характеризовался преимущественно «молодыми» грибными чехлами плектенхиматического типа, доминирующим был подтип В. Особенно это выражено на более молодой вырубке 2015 г., где его доля достигает 80 %. Вероятно, это обусловлено стадией развития сукцессии данного сообщества с доминированием определённых видов микобионтов. В целом, грибные чехлы подтипа В являются типичными и часто встречающимися для хвойных растений Республики Коми [38]. На вырубке 2008 г. и контрольном сосняке присутствовало около 20 % грибных чехлов подтипа Г, грибным симбионтом которого является хорошо узнаваемый по морфологическим признакам, устойчивый к неблагоприятным факторам засухоустойчивый вид *Cenococcum geophilum* [25, 39–41]. Его присутствие было подтверждено результатами молекулярного анализа (табл. 3).

Количество бесструктурных чехлов, характерных для завершающей стадии развития корневых окончаний [25, 36], было невелико на всех трёх изучаемых участках и достигало максимального значения в 17 % на девятилетней вырубке.

Состав грибов-микоризообразователей на корнях сосны. Для 42 образцов удалось выделить ДНК грибов, провести амплификацию и секвенирование ITS-региона (табл. 3). Из всех идентифицированных таксонов, достоверно относящихся к микоризообразователям, 15 видов из пяти семейств относятся к отделу Basidiomycota и один вид *Cenococcum geophilum* принадлежит отделу Ascomycota. Два вида – *Tylospora fibrillosa* и *C. geophilum* – встречались на всех трёх исследованных участках.

Контрольный участок – сосняк черничный – характеризовался наличием 10 видов микобионтов на микоризных окончаниях сосны. Наибольшей встречаемостью харак-

Таблица 2 / Table 2

Относительное обилие (%) подтипов грибных чехлов эктомикоризных корней сосны
Relative abundance (%) of fungal mantles subtypes in pine ectomycorrhizal roots

Тип место- обитания Habitat type	Группы подтипов и подтипы микоризных чехлов, % / Subtype groups and mycorrhizal mantles subtypes, %										Общее число корней, шт. Total root number, pcs
	Плектенхиматические Plectenchymatous						Псевдопарен- химатические Pseudoparen- chymatous	Двой- ные Double	Бесструк- турные Unstructured		
	A	B	Bч	C	D	E	F	G	J	RS	
Контроль Control	21,0	42,1	2,1	–	–	1,1	–	18,9	1,1	13,7	95
Вырубка 2008 г. Clear-cut of 2008	19,8	19,0	2,8	2,8	2,8	4,7	4,7	24,5	0,9	17,0	106
Вырубка 2015 г. Clear-cut of 2015	2,0	78,0	–	1,0	2,0	2,0	7,0	2,0	–	6,0	100

Примечание: прочерк означает, что чехлов данных подтипов не обнаружено. Подтипы грибных чехлов являются буквенными индексами, которые приведены в определителе [33].

Note: a dash means no mantles of these subtypes found. Fungal mantle subtypes are letter indices, which are given in identifier [33].

теризовались виды семейства Russulaceae. Большую долю составляла *Hebeloma velutipes* (18 %), образующая эктомикоризы с белым мицелием, тогда как на вырубке 2008 г. она встречалась не так часто (5 %). По сравнению с вырубками, возростала доля аскомицета *C. geophilum* до 10 %, а доля *T. fibrillosa*, наоборот, уменьшилась в два раза.

На вырубке 2015 г. обнаружено всего четыре таксона грибных симбионтов, тогда как на вырубке 2008 г. – 12 видов грибов. Наиболее часто встречающийся таксон в эктомикоризах сосны в сообществе – *Russula consobrina*, отмеченный в 70 % всех рассмотренных микоризных окончаний. Микоризы, образованные этим видом, характеризуются наличием псевдопаренхиматического грибного чехла коричневой окраски. Также достаточно высокая встречаемость наблюдалась у *Lactarius helvus* и *T. fibrillosa*.

Вырубка 2008 г. характеризовалась наибольшим богатством выделенных из корней грибов-микоризообразователей. Наибольшая встречаемость была отмечена для представителей семейства Russulaceae: *Russula paludosa* (23 %), *Lactarius helvus* (15 %), *Lactarius tabidus* (15 %). Также высокая встречаемость была выявлена для *Suillus variegatus* (Suillaceae, 15 %), который образует туберкулизованные хорошо узнаваемые эктомикоризы сосны с чехлами подтипа J [42]. В данном сообществе также присутствовали

четыре вида из рода *Cortinarius*, покрытые белыми гидрофобными гифами, встречаемость которых составляла от 1 до 5 %. Семейство Atheliaceae было представлено двумя видами: *Piloderma olivaceum* (образует микоризу с жёлтыми ризоморфами) и *T. fibrillosa* (формирует светло-коричневую эктомикоризу). Известно, что обильный мицелий семейства Atheliaceae с характерными разветвлёнными ризоморфами способствует адаптации его растений-хозяев к стрессовым условиям окружающей среды [43].

Наиболее сходны по видовому составу были сосняк черничный и вырубка 2008 г. (значения коэффициента Сёренсена-Чекановского 0,64).

Заключение

Таким образом, состояние эктомикоризного симбиоза сосны на вырубках отражает состояние растительного сообщества в целом. В контрольном сосняке показатели, характеризующие состояние растительного компонента симбиоза (диаметр эктомикориз и собственная корня, проводящего цилиндра) были достоверно выше по сравнению с вырубкой девяти лет, а показатели, характеризующие грибной компонент (толщина и объёмная доля грибного чехла, плотность эктомикориз), наоборот, ниже. На вырубках происходит изменение соотношения грибных чехлов. Начальные

Таблица 3 / Table 3
 Эктомикоризные симбионты, идентифицированные из корневых окончаний *P. sylvestris* / Ectomycorrhizal symbionts identified from root of *P. sylvestris*

Номер образца Sample No.	Идентифицированные OTU Identified OTU	Семейство Family	Встречаемость, % Occurrence, %	Номер GenBank No.	Результаты анализа BLAST	
					Идентичность (п.н.) Identity (bp)	Сходство (%) Similarity (%)
Контроль / Control						
9	<i>Piloderma</i> sp.		5	PP334423	565/565	100 OL436802
14	<i>Piloderma</i> sp.		5	PP334422	575/578	99 OQ410809
10	<i>Tylospora fibrillosa</i> (Burt) Donk	Atheliaceae	7	PP334427	536/538	99 JN943896
17	<i>T. fibrillosa</i> (Burt) Donk		7	PP334426	544/544	100 JN943896
8	<i>Cortinarius bififormis</i> Fr.	Cortinariaceae	1	PP334428	533/533	100 MH784746
18	<i>C. croceus</i> (Schaeff.) Gray		5	PP334407	619/620	99 FJ157108
3	<i>Cenococcum geophilum</i> Fr.	Gloniaceae	10	На основе морфологических признаков Based on morphological features		
1	<i>Hebeloma incarnatum</i> A.H. Sm.		1	PP334409	635/635	100 KT218428
6	<i>H. velutipes</i> Bruchet		18	PP334410	635/635	100 MN947346
7	<i>H. velutipes</i> Bruchet	Hymenogastraceae	18	PP334411	635/635	100 KC110672
12	<i>H. velutipes</i> Bruchet		18	PP334412	635/635	100 KC110672
15	<i>H. velutipes</i> Bruchet		18	PP334413	635/635	100 KC110672
21	<i>Russula paludosa</i> Britzelm.	Russulaceae	49	PP334396	632/632	100 JF908659
25	<i>R. vinosa</i> Lindblad		1	PP334391	632/632	100 JQ888203
13	<i>Suillus variegatus</i> (Sw.) Richon & Roze	Suillaceae	1	PP334416	619/631	98 AM084696
22	<i>S. variegatus</i> (Sw.) Richon & Roze		2	PP334417	566/621	91 AY898622
Вырубка 2015 г. / Clear-cutting 2015						
33	<i>Tylospora fibrillosa</i> (Burt) Donk	Atheliaceae	15	PP334424	541/541	100 JN943897
36	<i>Lactarius helvus</i> (Fr.) Fr.		10	PP334400	664/664	100 KT165300
26	<i>Russula consobrina</i> (Fr.) Fr.	Russulaceae	70	PP334397	623/623	100 OQ322557
27	<i>R. consobrina</i> (Fr.) Fr.		70	PP334398	623/623	100 OQ322557
30	<i>R. consobrina</i> (Fr.) Fr.		70	PP334399	623/623	100 OQ322557
31	<i>Cenococcum geophilum</i> Fr.	Gloniaceae	5	На основе морфологических признаков Based on morphological features		
Вырубка 2008 г. / Clear-cutting 2008						

49	<i>Piloderma olivaceum</i> (Parmasto) Hjortstam	Atheliaceae	2	PP334421	470/473	99	KP814448
67	<i>Tylospora fibrillosa</i> (Burt) Donk		15	PP334425	538/542	99	JN943896
45	<i>Cortinarius bififormis</i> Fr.		1	PP334429	530/533	99	MH784746
52	<i>C. bififormis</i> Fr.		1	PP334430	532/533	99	MH784746
53	<i>C. croceus</i> (Schaeff.) Gray	Cortinariaceae	2	PP334405	620/620	100	ON406286
55	<i>C. croceus</i> (Schaeff.) Gray		2	PP334406	620/620	100	ON406286
66	<i>Cortinarius semisanguineus</i> (Fr.) Gillet		1	PP334408	620/623	99	JN114090
70	<i>Cortinarius vibratilis</i> (Fr.) Fr.		5	PP334404	618/629	98	FJ717578
43	<i>Cenococcum geophilum</i> Fr.	Gloniaceae	1	PP334389	664/664	100	DQ179119
50	<i>C. geophilum</i> Fr.		1	PP334390	664/664	100	DQ179119
41	<i>Hebeloma velutipes</i> Bruchet		5	PP334414	634/635	99	KC110672
42	<i>H. velutipes</i> Bruchet	Hymenogastraceae	5	PP334415	634/635	99	KC110672
68	<i>Lactarius helvus</i> (Fr.) Fr.		15	PP334401	664/664	100	KT165300
51	<i>Lactarius tabidus</i> Fr.		15	PP334402	570/671	85	KP783447
56	<i>Russula paludosa</i> Britzelm.		23	PP334392	632/632	100	KP149057
57	<i>R. paludosa</i> Britzelm.	Russulaceae	23	PP334393	632/632	100	MH248053
58	<i>R. paludosa</i> Britzelm.		23	PP334394	632/632	100	MH248053
64	<i>R. paludosa</i> Britzelm.		23	PP334395	632/632	100	MH248053
56	<i>R. paludosa</i> Britzelm.		23	PP334392	632/632	100	JF908659
39	<i>Suillus variegatus</i> (Sw.) Richon & Roze		15	PP334418	625/628	99	JQ888210
47	<i>S. variegatus</i> (Sw.) Richon & Roze	Suillaceae	15	PP334419	607/620	98	JQ888210
63	<i>S. variegatus</i> (Sw.) Richon & Roze		15	PP334420	620/631	98	JQ888210

исследования видового состава микобионтов на корнях сосны показали преимущественно большее разнообразие грибов на более старой вырубке и сходство состава выявленных на ней грибов с контрольным сосняком. Всего на трёх исследованных участках присутствовало 15 видов грибов, типичных микоризообразователей. Общими для всех сообществ оказались два вида – *Tylospora fibrillosa* и *Cenococcium geophilum*. Наибольшей встречаемостью на всех участках характеризовались виды семейства Russulaceae.

Работа выполнена в рамках темы НИР «Средообразующая роль и продуктивность лесных и болотных экосистем Европейского Северо-Востока России» (125020501547-8).

References

1. Forests of the Komi Republic / Eds. G.M. Kozubov, A.I. Taskaev. Moskva: Dizayn, 1999. 332 p. (in Russian).
2. Orlov A.Ya., Koshelkov S.P. Soil ecology of pine. Moskva: Nauka, 1971. 324 p. (in Russian).
3. Prokushkin S.G. Mineral nutrition of pine (on cold soils). Novosibirsk: Nauka, 1982. 200 p. (in Russian).
4. Sazonova T.A., Bolondinskiy V.K., Pridacha V.B. Ecological and physiological characteristics of Scots pine. Petrozavodsk: Verso, 2011. 207 p. (in Russian).
5. Shubin V.I. Mycotrophy of tree species. Importance in forest cultivation in the taiga zone. Leningrad: Nauka, 1973. 264 p. (in Russian).
6. Shubin V.I. Specific features of organization of symbiotic macromycetes in forest ecosystems // Fungal communities of forest ecosystems: materialy koordinatsionnykh soveshchaniy. V. 2. Moskva – Petrozavodsk: Karelian Research Center of RAS, 2004. P. 272–286 (in Russian).
7. Vaishlya O.B., Kudashova N.N., Gashkov S.I., Karbysheva K.S., Bakhtinskaya I.A. First list of macromycetes forming ectomycorrhizas in cedar and pine forests of Tomsk region of West Siberia // Int. J. Environ. Stud. 2017. V. 74. No. 5. P. 752–770. doi: 10.1080/00207233.2017.1294422
8. Botalov V.S., Perevedentseva L.G., Shishigin A.S. Change of structure and productivity of the biota of agaricoid basidiomycetes according to the results of long-term monitoring in pine forests of the Perm krai (southern taiga subzone) // Sibirskiy Ekologicheskii Zhurnal. 2018. V. 25. No. 5. P. 559–571 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20180505
9. Malysheva E.F., Malysheva V.F., Shchepin O.N., Novozhilov Yu.K. Wildfire influence on structure and species composition of ectomycorrhizal fungal communities in pine forests in Northwest Russia: the results of metagenomic analysis // Mycology and phytopathology. 2018. V. 52. No. 5. P. 328–348 (in Russian). doi: 10.1134/S0026364818050057
10. Bogorodskaya A.V., Shishikin A.S. Microbiological assessment of soil state on cuttings of dark coniferous forests of Yenisei Ridge // Lesovedenie. 2014. No. 4. P. 67–75 (in Russian).
11. Dymov A.A. The impact of clearcutting in boreal forests of Russia on soils: a review // Pochvovedenie. 2017. No. 7. P. 787–798 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X17070024
12. Likhanova I.A., Genrikh E.A., Perminova E.M., Zheleznova G.V., Kholopov Yu.V., Lapteva E.M. The effects of clear cutting on the biodiversity of middle taiga blueberry spruce forests in the North-East of European Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 56–65 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-056-065
13. Byrd K.B., Parker T.V., Vogler D.R., Cullings K.W. The influence of clear-cutting on ectomycorrhizal fungus diversity in a lodgepole pine (*Pinus contorta*) stand, Yellowstone National Park, Wyoming, and Gallatin National Forest, Montana // Can. J. Bot. 2000. V. 78. No. 2. P. 149–156. doi: 10.1139/b99-171
14. Durall D.M., Gamiet S., Simard S.W., Kudrna L., Sakakibara S.M. Effects of clearcut logging and tree species composition on the diversity and community composition of epigeous fruit bodies formed by ectomycorrhizal fungi // Can. J. Bot. 2006. V. 84. P. 966–980. doi: 10.1139/B06-045
15. Predtechenskaya O.O., Ruokolainen A.V. The structure of the macrofungi biota at early stages of the post-felling succession // Transactions of KarRC RAS. 2013. No. 6. P. 27–37 (in Russian).
16. Harvey A.E., Jurgensen M.F., Larsen M.J. Clearcut harvesting and ectomycorrhizae: survival of activity on residual roots and influence on a bordering forest stand in western Montana // Can. J. For. Res. 1980. V. 10. No. 3. P. 300–303. doi: 10.1139/x80-051
17. Luoma D.L., Eberhart J.L., Molina R., Amaranthus M.P. Response of ectomycorrhizal fungus sporocarp production to varying levels and patterns of green-tree retention // For. Ecol. Manag. 2004. V. 202. No. 1–3. P. 337–354. doi: 10.1016/j.foreco.2004.07.041
18. Hartmann M., Howes C.G., VanInsberghe D., Yu H., Bachar D., Christen R., Henrik Nilsson R., Hallam S.J., Mohn W.W. Significant and persistent impact of timber harvesting on soil microbial communities in Northern coniferous forests // ISME J. 2012. V. 6. No. 12. P. 2199–2248. doi: 10.1038/ismej.2012.84
19. Parladé J., Martínez-Peña F., Pera J. Effects of forest management and climatic variables on the mycelium dynamics and sporocarp production of the ectomycorrhizal fungus *Boletus edulis* // For. Ecol. Manag. 2017. V. 390. Suppl. 1. P. 73–79. doi: 10.1016/j.foreco.2017.01.025
20. Bonet J.A., De-Miguel S., Martínez de Aragón J., Pukkala T., Palahí M. Immediate effect of thinning on the yield of *Lactarius* group *deliciosus* in *Pinus pinaster* forests in Northeastern Spain // For. Ecol. Manag. 2012. V. 265. P. 211–217. doi: 10.1016/j.foreco.2011.10.039

21. Tomao A., Bonet J.A., Martínez de Aragón J., De-Miguel S. Is silviculture able to enhance wild forest mushroom resources? Current knowledge and future perspectives // *For. Ecol. Manage.* 2017. V. 402. P. 102–114. doi: 10.1016/j.foreco.2017.07.039
22. Ostonen I., Lõhmus K., Lasn R. The role of soil conditions in fine root ecomorphology in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) // *Plant Soil.* 1999. V. 208. P. 283–292. doi: 10.1023/A:1004552907597
23. Eberhardt U. Molecular kinship analyses of the agaricoid *Russulaceae*: Correspondence with mycorrhizal anatomy and sporocarp features in the genus *Russula* // *Mycol. Progress.* 2002. V. 1. No. 2. P. 201–223. doi: 10.1007/s11557-006-0019-6
24. Veselkin D.V. Reaction of ectomycorrhizae *Pinus sylvestris* L. to various types of technogenic pollution // *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal.* 2005. No. 4. P. 753–761 (in Russian).
25. Veselkin D.V. Diversity and anatomical structure of ectomycorrhizas of *Picea obovata* in the high-altitude gradient (the Denezhkin Kamen' mountain range, the Middle Urals) // *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal.* 2008. No. 3. P. 497–505 (in Russian).
26. Tedersoo L., Hansen K., Perry B.A., Kjoller R. Molecular and morphological diversity of pezizalean ectomycorrhiza // *New Phytol.* 2006. V. 170. No. 3. P. 581–596. doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01678.x
27. Osipov A.F. Clear cuttings affecting the soil respiration of the middle taiga blueberry pine forest in the Komi Republic // *Lesovedenie.* 2022. No. 4. P. 395–406 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114822030111
28. Osipov A.F., Kuznetsov M.A. Influence of clear-cutting on ground vegetation biomass and draft shrubs increment in the Scots pine forests of the European North-East // *Cerne.* 2023. V. 29. No. 1. Article No. e-103107. doi: 10.1590/01047760202329013107
29. Smith M.E., Gryganskyi A., Bonito G., Nouhra E., Moreno-Arroyo B., Benny G. Phylogenetic analysis of the genus *Modicella* reveals an independent evolutionary origin of sporocarp-forming fungi in the Mortierellales // *Fungal Genet. Biol.* 2013. V. 61. P. 61–68. doi: 10.1016/j.fgb.2013.10.001
30. Kõljalg U., Nilsson R.H., Abarenkov K., Tedersoo L., Taylor A.F., Bahram M., Bates S.T., Bruns T.D., Bengtsson-Palme J., Callaghan T.M., Douglas B., Drenkhan T., Eberhardt U., Dueñas M., Grebenc T., Griffith G.W., Hartmann M., Kirk P.M., Kohout P., Larsson E., Lindahl B.D., Lücking R., Martín M.P., Matheny P.B., Nguyen N.H., Niskanen T., Oja J., Peay K.G., Peintner U., Peterson M., Põldmaa K., Saag L., Saar I., Schübler A., Scott J.A., Senés C., Smith M.E., Suija A., Taylor D.L., Telleria M.T., Weiss M., Larsson K.H. Towards a unified paradigm for sequence-based identification of fungi // *Molecular Ecology.* 2013. V. 22. P. 5271–5277. doi: 10.1111/mec.12481
31. Skupchenko V.B. Vibration microtomy of soft tissues. Syktyvkar: Komi filial AN SSSR, 1979. 54 p. (in Russian).
32. Veselkin D.V. Variability of anatomical parameters of ectomycorrhizal endings of different structures // *Mikologiya i fitopatologiya.* 2003. V. 37. No. 1. P. 22–29 (in Russian).
33. Selivanov I.A. Mycosymbiotrophism as a form of consortial relations in the plant covers of the Soviet Union. Moskva: Nauka, 1981. 232 p. (in Russian).
34. Agerer R. Fungal relationships and structural identity of their ectomycorrhizae // *Mycol. Progress.* 2006. V. 5. P. 67–107. doi: 10.1007/s11557-006-0505-x
35. Veselkin D.V. The diversity of Siberian spruce (*Picea obovata*) ectomycorrhizas in two natural environmental gradients // *Mikologiya i fitopatologiya.* 2010. V. 44. No. 4. P. 299–309 (in Russian).
36. Semenova L.A. Morphology of Scots pine in mature forests // *Mycorrhizal fungi and mycorrhizae of forest-forming species of the North.* Petrozavodsk: Institut lesa Karelskogo filiala AN SSSR, 1980. P. 103–132 (in Russian).
37. Veselkin D.V. Volumetric ratio of fungal and wood tissues of ectomycorrhizal roots of conifers // *Lesovedenie.* 2015. No. 2. P. 140–146 (in Russian).
38. Sizonenko T.A., Zagirova S.V. Structure and growth of Scots pine mycorrhiza root tips in coniferous phytocenoses of middle taiga // *Lesovedenie.* 2011. No. 4. P. 61–67 (in Russian).
39. Pigott C.D. Survival of mycorrhiza formed by *Cenococcum geophilum* Fr. in dry soils // *New Phytol.* 1982. V. 92. No. 4. P. 513–517. doi: 10.1111/j.1469-8137.1982.tb03409.x
40. Matsuda Y., Noguchi Y., Ito S.-I. Ectomycorrhizal fungal community of naturally regenerated *Pinus thunbergii* seedlings in a coastal pine forest // *J. For. Res.* 2009. V. 14. P. 335–341. doi: 10.1007/s10310-009-0140-x
41. Jany J.L., Martin F., Garbaye J. Respiration activity of ectomycorrhizas from *Cenococcum geophilum* and *Lactarius* sp. in relation to soil water potential in five beech forests // *Plant Soil.* 2003. V. 255. No. 2. P. 487–494. doi: 10.1023/A:1026092714340
42. Vaishlya O.B., Karbysheva K.S., Bender O.G. Characteristics of *Pinus sibirica* Du Tour mycotrophy in cedar stands of Tomsk region // *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii.* 2019. No. 229. P. 6–22 (in Russian). doi: 10.21266/2079-4304.2019.229.6-22
43. Rudawska M., Leski T., Stasińska M. Species and functional diversity of ectomycorrhizal fungal communities on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees on three different sites // *Ann. For. Sci.* 2011. V. 68. P. 5–15. doi: 10.1007/s13595-010-0002-x

Биоплёнки *Nostoc commune* как феномен многолетней природной вегетации в техногенной среде

© 2026. А. И. Коротких¹, ст. преподаватель, Л. В. Кондакова^{2,3}, д. б. н., профессор,
Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор, Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный агротехнологический университет,
610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

³Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: anastasi0301@yandex.ru, dli-alga@mail.ru

Проведён сравнительный анализ структурных особенностей природных биоплёнок *Nostoc commune*, вегетирующих в одном и том же техногенном экотопе в течение 20 лет. Данные биоплёнки представляют собой поликомпонентные сообщества, включающие фототрофные и сапротрофные микроорганизмы (МО) различных таксономических групп. Структура таких плёнок характеризуется экстремально высокой плотностью популяций, достигающей миллиардов клеток на 1 г воздушно-сухой массы. *Nostoc commune*, как доминант-эдификатор подобных наземных консорциумов, обладает способностью к длительному совместному существованию с представителями других фототрофных и гетеротрофных МО как прокариотных, так и эукариотных. Однако под влиянием природных и техногенных факторов возможны определённые изменения видового и количественного состава этих биоплёнок, которые, тем не менее, сохраняют свою сетчато-нитчатую структуру, напоминающую псевдоткань. Вероятно, основой формирования биоплёнок *N. commune* является природный внутривидовой пул МО, который первоначально даёт шаровидные колонии чистой культуры *N. commune*, впоследствии объединяющий других обитающих в почве микробов. Высокое родство *N. commune* к своим партнёрам в биоплёнке доказано при определении видовых, количественных и структурных особенностей биоплёнок, собранных в 2005 и 2025 гг. Устойчивость биоплёнок, обитающих и вегетирующих в техногенном экотопе, к возможному загрязнению обусловлена многофункциональными способностями партнёров: фотосинтезом цианобактерий и водорослей, азотфиксирующей способностью гетероцистных цианобактерий и гетеротрофных азотфиксаторов, деструктивной активностью аммонификаторов, микромицетов и актиномицетов, а также механической устойчивостью самих биоплёнок, связанной с развитием нитчатых цианобактерий, микромицетов (суммарная длина которых может достигать 1 км/г), и активным выделением слизи, в первую очередь, самого *N. commune* и других представителей. Полученные данные свидетельствуют о том, что биоплёнки *N. commune* в течение длительного периода функционируют как целостный «город микробов», все обитатели которого координированно адаптируются к изменяющимся условиям среды. Понимание этого уникального феномена саморегуляции открывает перспективы для решения теоретических и прикладных задач микробиологии и экологии.

Ключевые слова: *Nostoc commune*, природные биоплёнки, фототрофные и гетеротрофные микроорганизмы, видовой и количественный состав биоплёнок.

Nostoc commune biofilms as a phenomenon of perennial natural vegetation in a technogenic environment

© 2026. A. I. Korotkikh¹ ORCID: 0000-0002-0700-371X, L. V. Kondakova^{2,3} ORCID: 0000-0002-2190-686X,
L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Ave., Kirov, Russia, 610017,

²Institute of Biology of the Komi Science Centre
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

³Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: anastasi0103@yandex.ru, dli-alga@mail.ru

Structural features of natural *Nostoc commune* biofilms growing in the same technogenic ecotope for 20 years were analyzed. These biofilms are multicomponent communities, including phototrophic and saprotrophic microorganisms of various taxonomic groups. The structure of such biofilms is characterized by an extremely high population density, reaching 10^9 cells/1 g of dry mass. *Nostoc commune* is the dominant edifier of such terrestrial consortia. It has the ability to long-term coexistence with representatives of other phototrophic and heterotrophic microorganisms, both prokaryotic and eukaryotic. However, the species and quantitative composition of these biofilms changes affected by natural and technogenic factors. Nevertheless, the biofilm mesh-filament structure resembling pseudo-fabric retains. Probably, a natural in-soil pool of microorganisms is the basis for the *N. commune* biofilms forming. Spherical colonies of pure *N. commune* culture are the initial ones that subsequently combine other soil microbes. The *N. commune* has high affinity for its partners in biofilm. We confirmed in while determining the species, quantitative and structural features of biofilms collected in 2005 and 2025. Biofilms living and growing in a technogenic ecotope are resistant to possible contamination due to the multifunctional abilities of the partners, such as photosynthesis of cyanobacteria and algae, nitrogen-fixing ability of heterocyst-forming cyanobacteria and heterotrophic nitrogen fixers, destructive activity of ammonifiers, micromycetes and actinomycetes. The above may be updated by the biofilm mechanical stability associated with the development of filamentous cyanobacteria, micromycetes (the total length of which can reach 1 km/g), and active mucus secretion, primarily by *N. commune* itself and other representatives. The data obtained indicate that *N. commune* biofilms function for a long period as a holistic “city of microbes”, and all its inhabitants adapt in coordinated manner to changing environment. Understanding this unique phenomenon of self-regulation opens up prospects for solving theoretical and applied problems in microbiology and ecology.

Keywords: *Nostoc commune*, natural biofilms, phototrophic and heterotrophic microorganisms, biofilm species and quantitative composition.

Биоплёнки (БП) представляют собой совместно существующие моно- и поливидовые уникальные микробные комплексы, которые, обитая в различных экотопах, характеризуются особой структурной организацией. Универсальность такой формы сосуществования обеспечивается многофункциональностью внеклеточного матрикса. Эта сложная связующая структура помимо функций механической защиты и структурной поддержки, служит локальной специализированной средой обитания, которая координирует деятельность микроорганизмов (МО) в БП [1]. Состав и свойства матрикса зависят от видовой принадлежности продуцентов, синтезирующих полимерные субстраты, которые участвуют в образовании БП, максимально адаптированных к условиям окружающей среды [2]. Выступая в качестве буфера с высокой концентрацией метаболической активности, матрикс напрямую способствует усилению устойчивости всего микробного сообщества к воздействию неблагоприятных факторов среды.

Способность к поддержанию стабильной численности микробного пула в БП является фундаментальным условием, обеспечивающим их экологическую пластичность. Так, микробные консорциумы встречаются в самых разных условиях: в толще воды и на дне подводных поверхностей [3–5], на границе воды и воздуха в прибрежных зонах [6, 7], на различных поверхностях в воздушно-наземной сфере [8–10], а также в виде сложных сообществ, колонизирующих живые ткани животных, растений и человека

[11–13], где они могут играть как защитную, так и патогенную роль.

Среди подобных БП особую роль занимают природные цианобактериальные биоплёнки (ЦБ БП). Обладая статусом космополитов, ЦБ БП осваивают самые разные субстраты по всей нашей планете [14–16]. Глобальной эволюционной ролью ЦБ консорциумов является насыщение атмосферы кислородом, активная фиксация атмосферного азота, а также их первичное заселение на каменистых субстратах и песках [17, 18]. В процессе жизнедеятельности БП ЦБ могут интенсивно увеличивать свою биомассу на обитаемом субстрате, что приводит к явлению «цветения почв» [19]. Образующие ЦБ при их массовом развитии на различных субстратах биоценозы характеризуются комплексным составом, включающим также водоросли, бактерии и микромицеты.

Особую роль в природе занимают БП, в которых доминирующим колонизатором является ЦБ *Nostoc commune* Vauch. ex Bornet et Flahault. Они отличаются светоустойчивостью, устойчивостью к засухе, могут удерживать поглощённую воду, что даёт возможность в составе биоплёнок адаптироваться к меняющимся условиям среды. Многочисленные исследования подробно описывают видовой состав подобных БП, который представлен как прокариотическими и эукариотическими фототрофами (ЦБ, зелёные, жёлто-зелёные и диатомовые водоросли), так и разнообразными гетеротрофными прокариотами, включая актиномицеты, бактерии, и эукариотными микромицетами [20–22]. Согласно прове-

Результаты и обсуждение

дёнными экспериментальными исследованиями, антропогенное воздействие, выражающееся в изменении параметров внешней среды и увеличении уровня поллютантов, вызывает существенные изменения в структуре и численности микробных БП. В частности, исследования влияния токсикантов на БП *N. commune* подтверждают способность альго-цианобактериальных комплексов к немедленной реакции при изменении условий окружающей среды [23–27]. В современных условиях, с увеличением антропогенной нагрузки и прогрессирующего загрязнения почв поллютантами, именно природные наземные БП *N. commune* могут сыграть большую экологическую роль биофильтров, а также индикаторов в оценке состояния окружающей среды.

Цель работы – сравнить видовой, количественный и групповой состав фототрофного и гетеротрофного компонентов биоплёнок *Nostoc commune*, вегетирующих в течение 20 лет в урбанизированной среде с высокой техногенной нагрузкой.

Объекты и методы исследования

Методика исследования видовых, количественных и структурных особенностей БП *N. commune*, собранных в 2025 г., полностью повторяла методику исследований подобных БП, отобранных в этом же экотопе в 2005 г. Отбор проб БП в оба года исследований проводили в одном и том же месте – на обочине автотрассы в окрестностях г. Дзержинска (Нижегородская область) (рис. 1, см. цв. вкладку IV).

Определение видового состава альго-цианобактериальной микробиоты проводили постановкой чашечных и водных культур в сочетании с методом прямого микроскопирования БП [28]. Количественный учёт водорослей и цианобактерий проводили методом микроскопирования на мазках [19]. Численность гетеротрофных МО определяли методом предельных разведений с последующим высевом на селективные агаризованные питательные среды глубинным способом: ГРМ-агар для аммонификаторов, Чапека – для микромицетов, Эшби – для азотфиксаторов, крахмало-аммиачный агар – для актиномицетов [29].

Статистическую обработку результатов проводили в программе Microsoft Excel. В таблицах и на рисунках, представленных в работе, указаны средние значения и стандартные отклонения.

Особенности видового состава фототрофного комплекса биоплёнок *Nostoc commune*.

Состав альго-цианобактериальной микробиоты БП *N. commune* представлен в таблице 1. За последние 20 лет произошло обеднение флористического состава, которое выразилось в снижении общего числа видов фототрофов: с 23 видов в 2005 г. до 12 – в 2025 г. При этом из флоры полностью выпали группы нитчатых зелёных водорослей, жёлто-зелёных и эустигматофитовых. Число видов ЦБ-азотфиксаторов снизилось с 5 видов до 3, а безгетероцистных (БГЦ) ЦБ – с 9 до 6 видов.

Общими видами БП остаются: гетероцистные (ГЦ) ЦБ *N. commune*, *N. punctiforme*, *Calothrix elenkinii*, БГЦ ЦБ *Phormidium autumnale*, *Ph. boryanum*, *Ph. formosum*, *Leptolyngbya angustissima*, *L. foveolarum*, *Plectonema nostocorum*, одноклеточные зелёные водоросли *Clorella vulgaris*, *Chlorococcum infusionum*, *Chlamydomonas gloeogama*, которые, вероятно, являются определяющими в формировании текстуры данных биоплёнок. Выпадение отдельных видов может быть связано как с климатическими факторами, так и с усилением техногенной нагрузки за прошедшие 20 лет, в результате чего сохраняются наиболее устойчивые и адаптированные виды.

Численность и структура фототрофных микроорганизмов в биоплёнках *N. commune*.

Суммарная численность фототрофных МО представлена на рисунке 2. Численность фототрофных МО в биоплёнках составляет миллиарды клеток/г. При этом, отмечаются более высокие результаты плотности микробных популяций в 2005 г. – 2,717 млрд клеток/г, по сравнению с 2025 г. – 1,213 млрд клеток/г (рис. 3). Виду *N. commune* принадлежит ведущая роль: его доля в общей численности составляет 83 % в 2005 г. и 51 % в 2025 г.

Численность и структура гетеротрофных микробных комплексов биоплёнок *N. commune*.

Численность гетеротрофных МО в БП составляет несколько миллионов КОЕ/г, при этом в отличие от фототрофных МО, наблюдается существенное преобладание обилия гетеротрофных микробов в 2025 г. по сравнению с 2005 г. (рис. 4). Существенный рост фиксируется для группы аммонификаторов, численность которой возросла почти в 2 раза, а также азотфиксаторов и микромицетов в 9 и 11 раз соответственно.

В структуре гетеротрофных популяций в оба года исследований доминирующей группой являются аммонификаторы, на долю

О. З. Еремченко, Е. Е. Малышкина, И. В. Пахоруков
«Распространение солеустойчивой растительности
в поймах при техногенном засолении почв». С. 161.



Рис. 4. Картограмма распространения изреженной
солеустойчивой растительности в пойме р. Лёнвы в 2015 и 2021 гг.
Fig. 4. The distribution of salt-tolerant plants in the Lyonva River floodplain in 2015 and 2021

А. И. Коротких, Л. В. Кондакова, Л. И. Домрачева, Т. Я. Ашихмина
«Биоплёнки *Nostoc commune* как феномен
многолетней природной вегетации в техногенной среде». С. 209.

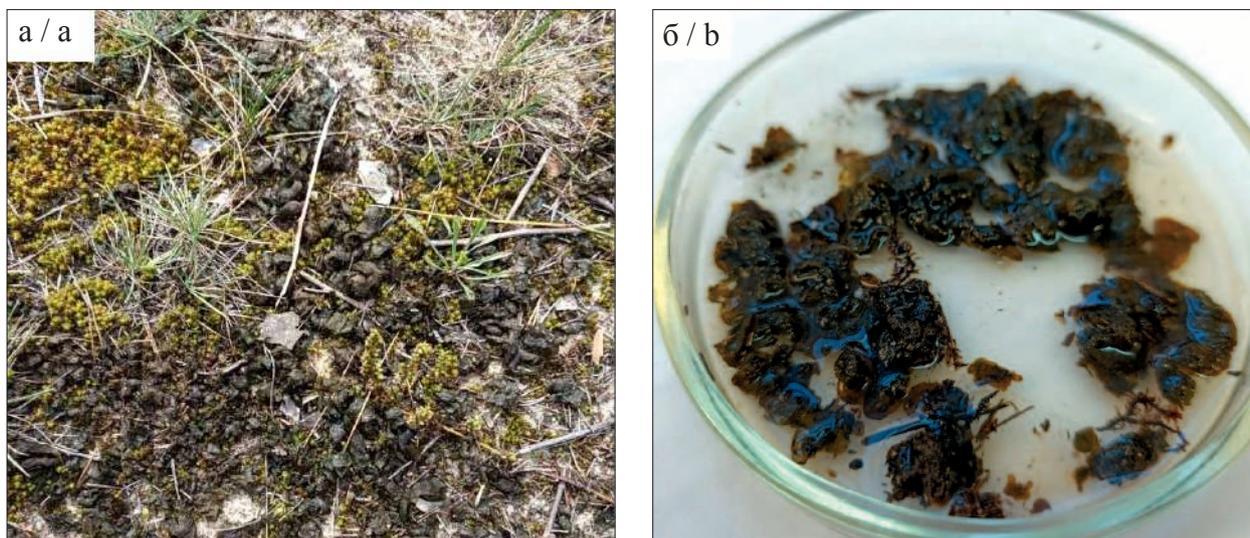


Рис. 1. Внешний вид биоплёнок *Nostoc commune*, сформировавшихся
в естественных местообитаниях (а) и в условиях лабораторного культивирования (б)
Fig. 1. *Nostoc commune* biofilms formed in natural habitats (a) and by laboratory cultivation (b)

Таблица 1 / Table 1

Видовой состав фототрофов биоплёнок *Nostoc commune* по данным наблюдений 2005 и 2025 гг.
Species composition of phototrophs of biofilm *Nostoc commune* according to observations of 2005 and 2025

Группы фототрофов Phototrophs' groups	Отмеченные виды / Identified species	
	в 2005 году / in 2005	в 2025 году / in 2025
Гетероцистные цианобактерии Heterocystic-forming cyanobacteria	1. <i>Nostoc commune</i> 2. <i>Nostoc punctiforme</i> 3. <i>Tolypothrix tenuis</i> 4. <i>Calothrix elenkinii</i> 5. <i>Microchaete tenera</i>	1. <i>Nostoc commune</i> 2. <i>Nostoc punctiforme</i> 3. <i>Calothrix elenkinii</i>
Безгетероцистные цианобактерии Non-heterocystic-forming cyanobacteria	6. <i>Phormidium autumnale</i> 7. <i>Ph. boryanum</i> 8. <i>Ph. formosum</i> 9. <i>Leptolyngbya frigidum</i> 10. <i>L. fragilis</i> 11. <i>L. foveolarum</i> 12. <i>L. angustissima</i> 13. <i>Oscillatoria</i> sp. 14. <i>Oscillatoria</i> sp.	4. <i>Phormidium autumnale</i> 5. <i>Ph. boryanum</i> 6. <i>Ph. formosum</i> 7. <i>Leptolyngbya angustissima</i> 8. <i>L. foveolarum</i> 9. <i>Plectonema nostocorum</i>
Одноклеточные зелёные водоросли Unicellular green algae	15. <i>Clorella vulgaris</i> 16. <i>Chlamydomonas gloeogama</i> 17. <i>Chlorococcum</i> sp. 18. <i>Coenocystis planctonica</i>	10. <i>Clorella vulgaris</i> 11. <i>Chlorococcum infusionum</i> 12. <i>Chlamydomonas gloeogama</i>
Нитчатые зелёные водоросли Filamentous green algae	19. <i>Stichococcus bacillaris</i> 20. <i>Klebsormidium flaccidum</i> 21. <i>K. rivulare</i>	Не обнаружены / Not detected
Жёлто-зелёные и эустигмато- фитовые водоросли / Yellow- green and eustigmatophytic algae	22. <i>Characiopsis minima</i> 23. <i>Eustigmatos magnus</i>	Не обнаружены / Not detected

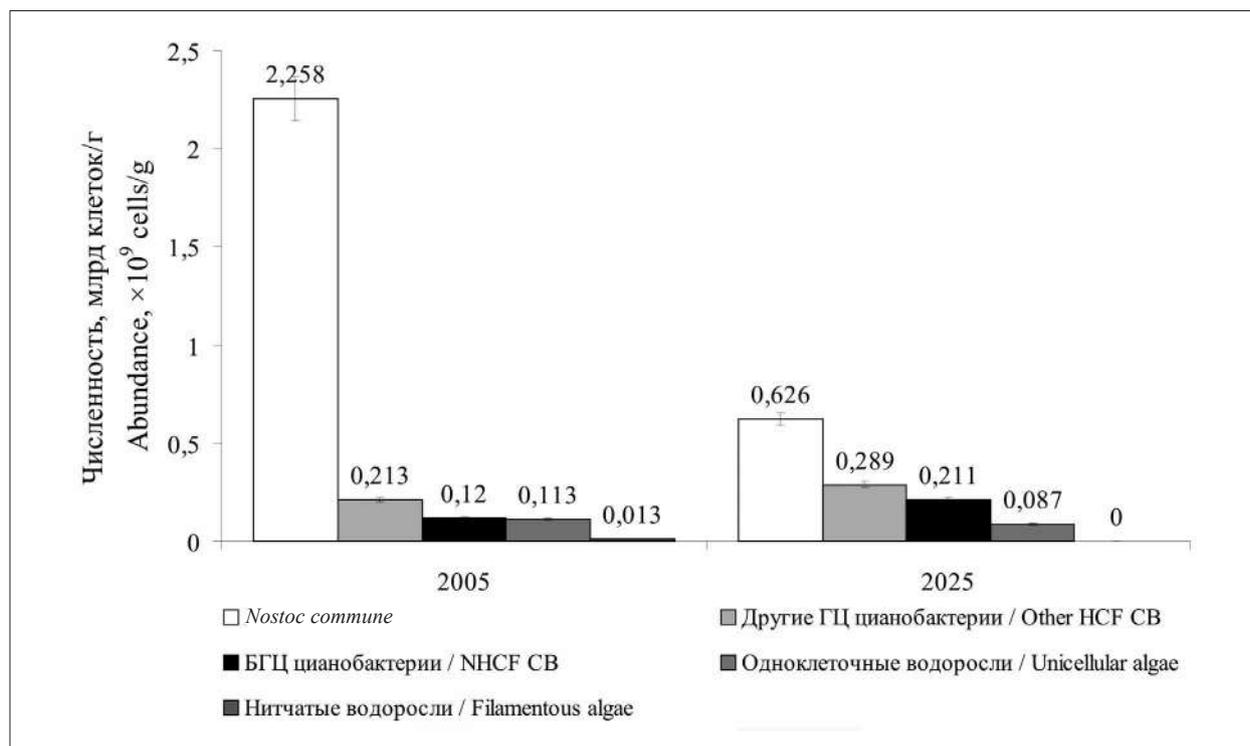


Рис. 2. Численность фототрофных микроорганизмов БП *N. commune* в 2005 и 2025 гг. Примечание: здесь, на рис. 3 и в таблице 2: БГЦ – безгетероцистные, ГЦ – гетероцистные / Fig. 2. Phototrophic microbial abundance and structure in *Nostoc commune* biofilms in 2005 and 2025. Note: here and in Fig. 3: NHCF CB – non-heterocyst-forming cyanobacteria, HCF CB – heterocyst-forming cyanobacteria

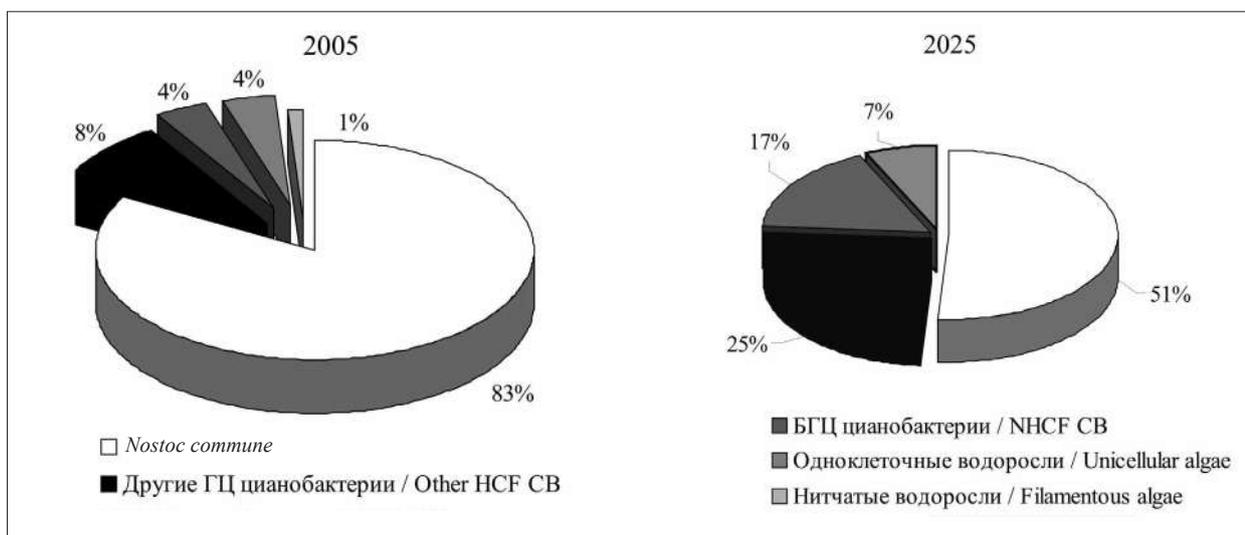


Рис 3. Долевое соотношение (%) альго-цианобактериальных групп фототрофного комплекса *N. commune* в 2005 и 2025 гг. / Fig. 3. Proportion (%) of alga-cyanobacterial groups in *N. commune* phototrophic complex in 2005 and 2025

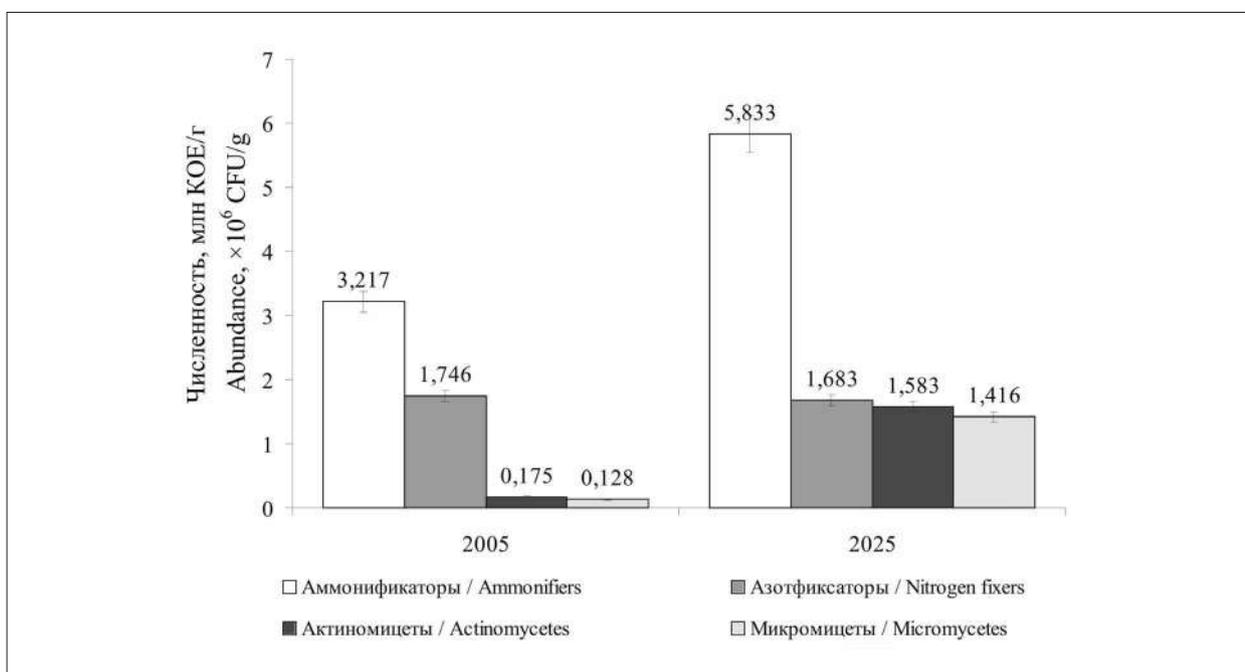


Рис. 4. Численность гетеротрофных микроорганизмов в составе биоплёнок *N. commune* в 2005 и 2025 гг., млн КОЕ/г / Fig. 4. Heterotrophic microorganism abundance in *N. commune* biofilms in 2005 and 2025, million CFU/g

которых приходится 61 % в 2005 г. и 55 % в 2025 г. (рис. 5). Вероятно, наблюдаемый рост численности аммонифицирующих бактерий связан с увеличением количества некромассы в БП на момент исследования.

Результаты комплексного анализа биоплёнок *N. commune*. Изучение БП *N. commune*, отобранных в одном и том же экотопе с интервалом в 20 лет, показало, что, несмотря на изменения в видовом и групповом составе фототрофных и гетеротрофных симбионтов,

текстура БП сохраняется. Феномен подобных БП состоит в том, что доминант-эдификатор *N. commune* способен объединять в едином матриксе многочисленные виды фототрофов и разнообразные группы гетеротрофных МО (табл. 2, рис. 2–5).

Полученные результаты показывают, что исследуемые БП *N. commune* представляют собой динамичные системы. Несмотря на отмеченное к 2025 г. снижение флористического обилия и частичную смену видов фототрофов, домини-

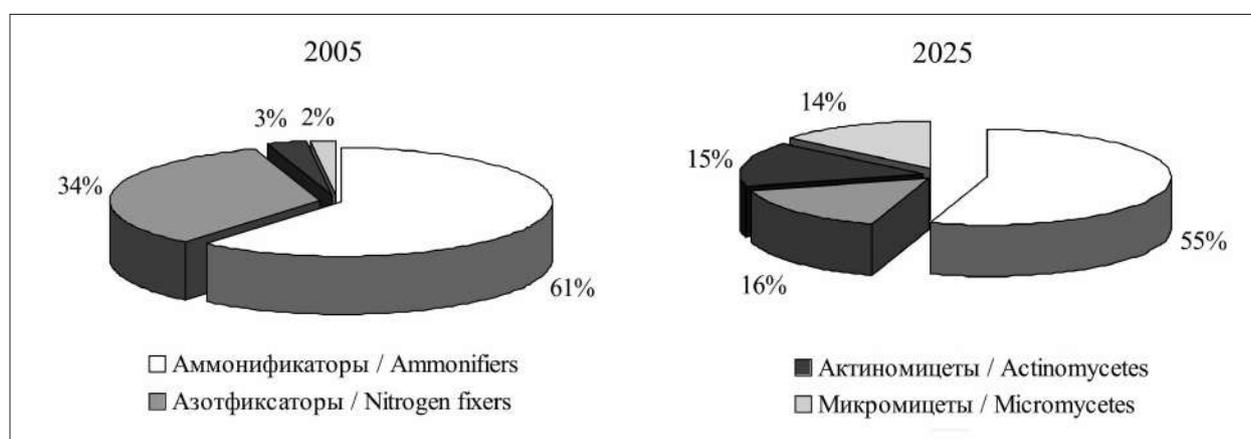


Рис. 5. Долевое соотношение различных микробных группировок биоплёнок *N. commune* в 2005 и 2025 гг., % / Fig. 5. Proportion of different microbial groups in *N. commune* biofilms in 2005 and 2025, %

Таблица 2 / Table 2

Сравнительная характеристика биоплёнок *N. commune*
N. commune biofilm comparative analysis

Показатели / Indicators	Год / Year	
	2005	2025
Количество видов водорослей / Algae species number	9	3
Количество видов ЦБ / Cyanobacteria species number	14	9
Количество видов фототрофов / Phototrophs species number	23	12
Численность фототрофных микроорганизмов в составе биоплёнок <i>N. commune</i> , млрд. клеток/г / Number of phototrophic microorganisms in <i>N. commune</i> biofilms, $\times 10^9$ cells/g	2,717	1,213
Численность гетеротрофных микроорганизмов в составе биоплёнок <i>N. commune</i> , млн. КОЕ/г / Number of heterotrophic microorganisms in <i>N. commune</i> biofilms, $\times 10^6$ CFU/g	5,266	10,515

рование ЦБ *N. commune* сохраняется. Наличие нитчатых ЦБ, а также мицелиальных форм актиномицетов и грибов (длина мицелия которых может достигать 1 км/г) [20] обеспечивает формирование прочной структуры биоплёнок. В такой системе смена или выпадение отдельных компонентов не носит катастрофического характера. Увеличение доли микробов-гидролитиков (аммонификаторов, актиномицетов, микромицетов) в 2025 г. указывает на возрастание количества мёртвого органического вещества, источником которого служат как компоненты самой БП, так и её матрикс. Относительное постоянство состава БП, вероятно, обусловлено спецификой той насыщенной фототрофами и гетеротрофами среды, которую можно обозначить как циано-альгосфера – по аналогии с понятием почвенной ризосферы.

Заключение

Таким образом, в результате проведённых исследований показано, что биоплёнки *N. commune* представляют собой не эфемерные,

а длительно существующие, структурированные многовидовые комплексы, характеризующиеся высокой плотностью популяций как фототрофов, так и гетеротрофов. Эдификатором этих сообществ выступает ЦБ *N. commune*, чей вклад в их формирование структуры составляет от 83 % в 2005 г. до 51 % в 2025 г. Благодаря тому, что *N. commune* образует консорциумы с другими видами ЦБ и водорослей, БП проявляют высокую толерантность к флуктуациям среды. Утрата отдельных компонентов в таких условиях не влечёт за собой разрушения всей системы.

Изучение формирования БП *N. commune* позволяет говорить об особой природной агрегации микробов разной систематической принадлежности, синхронное развитие которых приводит к образованию текстур, напоминающих псевдоткань. Биоплёнки *N. commune* представляют собой уникальный феномен – многовидовые микробные комплексы, адаптированные как к совместному существованию, так и к условиям внешней среды. Их изучение открывает перспективы использования таких

БП в качестве тест-систем, моделирующих начальные этапы формирования сукцессионных сообществ, подобно первичным лишайниковым субстратам.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 125021402208-5.

References

1. Pinevich A.V., Kozhevnikova E.V., Averina S.G. Biofilms and other prokaryotic consortia. St. Petersburg: Khimizdat, 2018. 264 p. (in Russian).
2. Christner M., Heinze C., Busch M., Franke G., Hentschke M., Bayard Dühring S., Büttner H., Kotasinska M., Wischniewski V., Kroll G., Buck F., Molin S., Otto M., Rohde H. *sarA* negatively regulates *Staphylococcus epidermidis* biofilm formation by modulating expression of 1 MDa extracellular matrix binding protein and autolysis-dependent release of eDNA // *Mol. Microbiol.* 2012. V. 86. No. 2. P. 394–410. doi: 10.1111/j.1365-2958.2012.08203.x
3. Andreeva N.A., Melnikov V.V., Snarskaya D.D. The role of cyanobacteria in marine ecosystems // *Rus. J. Mar. Biol.* 2020. V. 46. No. 3. P. 154–165. doi: 10.1134/S1063074020030025
4. Qin Z., Zhao Z., Xia L., Ohore O.E. Research trends and hotspots of aquatic biofilms in freshwater environment during the last three decades: a critical review and bibliometric analysis // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. V. 29. No. 32. P. 47915–47930. doi: 10.1007/s11356-022-20238-6
5. Hope J.A., Kleinteich J., Gerbersdorf S.U. Benthic biofilm structure and function under abrupt flow changes // *PLoS One.* 2025. V. 20. No. 7. Article No. e0327216. doi: 10.1371/journal.pone.0327216
6. Edelshtein K.K., Datsenko Yu.S., Puklakov V.V. Water blooming in the reservoir with long-term discharge regulation // *Water Resour.* 2021. V. 48. No. 2. P. 245–253. doi: 10.1134/S0097807821020044
7. Shaheen A., Kazmi S.U., Zafar U., Mahmood T., Hasnain S. Impacts of coastal development and microbial biofilm adaptation: towards ecosystem resilience // *J. Coast. Conserv.* 2025. V. 29. Article No. 34. doi: 10.1007/s11852-025-01119-9
8. Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Korotkikh A.I., Kondakova L.V., Skugoreva S.G., Fokina A.I. Permanent growth on a stony substrate // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2025. V. 52. Article No. 210. doi: 10.1134/S1062359025700244
9. Buis E.E., Veldkamp A., Boeken B., van Breemen N. Controls on plant functional surface cover types along a precipitation gradient in the Negev Desert of Israel // *J. Arid Environ.* 2009. V. 73. No. 1. P. 82–90. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.09.008
10. Wang G., Li T., Zhou Q., Zhang X., Li R., Wang J. Characterization and environmental applications of soil biofilms: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2024. V. 22. P. 1989–2011. doi: 10.1007/s10311-024-01735-1
11. Leontieva A.V., Pototskaya L.A., Chervinets Yu.V. Mechanisms of oral microbial biofilm formation in healthy people and patients with chronic generalized periodontitis // *Parodontologiya.* 2023. V. 28. No. 3. P. 208–217 (in Russian). doi: 10.33925/1683-3759-2023-794
12. Ren A., Zhou Y., Xu Z., Jia T., Yang L. Multiple-species biofilms as structuralized microbial communities for modulating microbiota homeostasis in human // *Curr. Med.* 2024. V. 3. Article No. 12. doi: 10.1007/s44194-024-00039-4
13. Molina M.A., Ramos J.L., Espinosa-Urgel M. Plant-associated biofilms // *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 2003. V. 2. P. 99–108. doi: 10.1023/B:RE SB.0000040458.35960.25
14. Carey C.C., Ibelings B.W., Hoffman E.P., Hamilton D.P., Brookes J.D. Eco-physiological adaptations that favour freshwater cyanobacteria in a changing climate // *Water Res.* 2012. V. 46. No. 5. P. 1394–1407. doi: 10.1016/j.watres.2011.12.016
15. Lopes V.R., Vasconcelos V.M. Planktonic and benthic cyanobacteria of European brackish waters: a perspective on estuaries and brackish seas // *Eur. J. Phycol.* 2016. V. 46. No. 3. P. 292–304. doi: 10.1080/09670262.2011.602429
16. Velichko N., Smirnova S., Averina S., Pinevich A. A survey of Antarctic cyanobacteria // *Hydrobiologia.* 2021. V. 848. No. 11. P. 2627–2652. doi: 10.1007/s10750-021-04588-9
17. Lyons T.W., Reinhard C.T., Planavsky N.J. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere // *Nature.* 2014. V. 506. No. 7488. P. 307–315. doi: 10.1038/nature13068
18. Sciuto K., Moro I. Cyanobacteria: the bright and dark sides of a charming group // *Biodivers. Conserv.* 2015. V. 24. P. 711–738. doi: 10.1007/S10531-015-0898-4
19. Domracheva L.I. Soil “blooming” and its development patterns. Syktyvkar: Institut biologii Komi NTs UrO RAN, 2005. 336 p. (in Russian).
20. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Pegushina O.A., Fokina A.I. A biofilm of *Nostoc commune* as a special sphere of microbiota // *Theoretical and Applied Ecology.* 2007. No. 1. P. 15–19 (in Russian).
21. Rakić I.Z., Kevrešan Ž.S., Kovač R., Kravić S.Ž., Svirčev Z., Đjurović A., Stojanović Z. Bioaccumulation and biosorption study of heavy metals removal by Cyanobacteria *Nostoc* sp. // *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 2023. V. 29. No. 4. P. 291–298. doi: 10.2298/ciceq220511002r
22. Zakirova Z.R., Dubovik I.E., Kireeva N.A. Distribution of the *Nostoc commune* in anthropogenically disturbed soils of the Republic of Bashkortostan and its accompanying organisms // *Individual and population –*

life strategies: sbornik materialov IX Vserossijskogo populyacionnogo seminaru. V. 1. Ufa: Vili Oxler LLC Publ., 2006. P. 337–342 (in Russian).

23. Patova E., Sivkov M. Accumulation of heavy metals by *Nostoc commune* Vauch. ex Bornet et Flahault (cyanoprokaryota) in terrestrial tundra ecosystems of the Russian Arctic // *Algol. Stud.* 2003. No. 109. P. 469–473. doi: 10.1127/1864-1318/2003/0109-0469

24. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V., Berezin G.I. Reaction of soil microbiota to pesticides (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2012. No. 3. P. 4–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-004-018

25. Lavado-Meza C., de la Cruz-Cerrón L., Lavado-Puente C., Angeles-Suazo J., Dávalos-Prado J.Z. Efficient lead Pb(II) removal with chemically modified *Nostoc com-*

mune biomass // *Molecules.* 2023. V. 28. No. 1. P. 268–284. doi: 10.3390/molecules28010268

26. Skugoreva C.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Evaluation of the sorption efficiency of lead(II) ions using models of kinetics and sorption isotherm // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 3. P. 44–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-044-051

27. Kondakova L.V., Domracheva L.I., Pegushina O.A., Fockina A.I. Disbalance factors and *Nostoc commune* // *Soil contamination: new research* / Ed. A.N. Dubois. New York: Nova Science Pub. Inc., 2008. P. 189–199.

28. Gollerbakh M.M., Shtina E.A. Soil algae. Leningrad: Nauka, 1969. 228 p. (in Russian).

29. Workshop on microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Academy Publ., 2005. 608 p. (in Russian).

Мониторинг популяции прибрежницы одноцветковой и среды её произрастания в озере Свитязь (Республика Беларусь)

© 2026. И. П. Вознячук, к. б. н., в. н. с.,
Н. Д. Грищенкова, к. г. н., в. н. с.,
Н. Л. Вознячук, н. с.,

Государственное научное учреждение «Институт экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси»,
220072, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Академическая, д. 27,
e-mail: nhrysh@gmail.com

На основании многолетних исследований (2000–2023 гг.) проведена оценка состояния популяции исключительно редкого для Беларуси, исчезающего, охраняемого вида – прибрежницы одноцветковой (*Littorella uniflora* (L.) Aschers.), и среды её произрастания в единственно известном местонахождении в Беларуси – озере Свитязь. Выявлена ценотическая роль вида в сообществе, его динамика в зависимости от биотопических, экотопических и антропогенных факторов. Установлены границы распространения вида в пределах озера, проведена оценка изменений характера зарастания водоёма и физико-химических показателей воды. Выявлены основные угрозы и предложены меры по восстановлению среды обитания *L. uniflora*. Обнаружены признаки прогрессирующего эвтрофирования: снижение содержания соединений азота и отсутствие фосфатов в поверхностном слое воды за счёт более активного развития фитопланктона; формирование сероводородной зоны в гипolimнионе; снижение содержания растворённого кислорода и прозрачности воды до 2–3 м; «цветение» воды; рост протяжённости тростниковых зарослей (до 52 % длины береговой линии) и увеличение их плотности; стремительная деградация пояса гидрофитной растительности (глубина максимального произрастания подводных растений сократилась с 7,0 до 2,5 м за 40-летний период). Анализ видового состава высшей водной растительности показал его сокращение с 14 до 8 видов за счёт выпадения ряда видов погружённых растений, что свидетельствует о структурной перестройке растительных сообществ в сторону гелофитной растительности и ухудшении качества воды. В подводных сообществах *L. uniflora* сохраняет доминирующие позиции, однако её обилие снижается. Основной причиной деградации озера и популяции *L. uniflora* являются чрезмерная рекреационная нагрузка и изменение гидрологического режима. Предложены мероприятия по регулированию рекреационной нагрузки, улучшению санитарного состояния побережья и ряд внутренних мер. Рекомендации направлены на стабилизацию экологического состояния озера, поддержание устойчивости его экосистемы и охрану уникальной популяции *L. uniflora*.

Ключевые слова: прибрежница одноцветковая, *Littorella uniflora* (L.) Aschers., озеро Свитязь, водная растительность, мониторинг, рекреационная нагрузка, эвтрофирование, восстановление.

Monitoring of the *Littorella uniflora* population and its habitat in Lake Svityaz (Republic of Belarus)

© 2026. I. P. Voznyachuk ORCID: 0009-0005-1427-1025[?]
N. D. Hryshchankava ORCID: 0000-0003-2116-8462[?]
N. L. Voznyachuk ORCID: 0009-0007-4328-636X[?]

The State Scientific Institution “V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus”,
27, Akademicheskaya St., Minsk, Republic of Belarus, 220072,
e-mail: nhrysh@gmail.com

We assessed the status of *Littorella uniflora* (L.) Aschers. population and its habitat based on long-term studies (2000–2023). It is an extremely rare, endangered, protected species for Belarus. Lake Svityaz is the only known location of *L. uniflora* habitat in Belarus. The species cenotic role in the community, its dynamics depending on biotopic, ecotopic and anthropogenic factors were revealed. The boundaries of the species distribution within the lake were determined. We assessed the changes in lake overgrowth and physicochemical indicators of the water over the long-term observation period. Major threats have been identified and measures to restore the *L. uniflora* habitat are proposed. Signs of progressive eutrophication are detected: decreased nitrogen compounds and the absence of phosphates in the surface water layer due to the phytoplankton active development; hydrosulphuric zone in the hypolimnion; a decrease in the dissolved oxygen content and transparency of water to 2–3 m; water “blooming”; an increase in the reed beds’ density and extent (up to

52 % of the coastline); rapid degradation of the hydrophytic vegetation belt (the depth of maximum growth of submerged plants decreased from 7.0 to 2.5 m over a 40-year period). Analysis of the higher aquatic vegetation species composition showed its reduction from 14 to 8 species due to the loss of a number of submerged plant species. The above indicates a structural restructuring of plant communities towards helophytic vegetation and deterioration in water quality. *Littorella uniflora* dominates in underwater communities, but its abundance is declining. Excessive recreational load and changes in hydrological regime degrade the Lake Svityaz and the *L. uniflora* population. We proposed some measures to regulate recreational load, improve the sanitary condition of the coast and a number of internal measures. The recommendations are aimed to stabilize the lake ecological status, to conserve the sustainability of its ecosystem and to protect the *L. uniflora* unique population.

Keywords: *Littorella uniflora* (L.) Aschers., Lake Svityaz, aquatic vegetation, monitoring, recreational load, eutrophication, restoration.

Приоритетным направлением в охране редких видов является сохранение их в природных ареалах путём поддержания оптимальных условий среды обитания с учётом экологических и биологических характеристик вида.

Прибрежница одноцветковая (*Littorella uniflora* (L.) Aschers.) представляет собой крайне редкий, исчезающий вид для территории Беларуси (категория I (CR) национальной природоохранной значимости согласно постановлению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 14.03.2025 № 10). В соседних странах (Латвия [1], Польша [2], Россия (приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 23.05.2023 № 320)) этот вид также находится под охраной. Основной ареал *L. uniflora* охватывает европейский регион: Скандинавию, Атлантическую, Среднюю и Восточную Европу (включая страны Прибалтики и западные, северо-западные области России), а также западные районы Средиземноморья [3]. На территории Беларуси достоверно известно лишь одно место – озеро Свитязь (Новогрудский район, Гродненская область), расположенное на юго-восточной окраине ареала вида.

По данным гербарных коллекций, *L. uniflora* присутствует в этом водоёме не менее двух столетий: в гербарии Вильнюсского университета (WI) хранятся образцы, собранные А. Мельцером в 1826 г., а также Я. Колодичеком и Я. Некрашем в 1908 г. [4]. Более поздние гербарные образцы датируются 1964 г. (Гербарий ИЭБ НАН Беларуси (MSK), коллектор А.Б. Моисеева). На протяжении последующих десятилетий наличие вида в оз. Свитязь неоднократно подтверждалось флористами страны. В 1830 г. вид указывался Эйхвальдом (Eichwald) также для оз. Колдычевское, расположенного в 21 км к юго-востоку от оз. Свитязь [5]. Однако последующие исследования не подтвердили присутствия вида в этом водоёме. В рамках

исследований 2013 г. было установлено, что из-за торфоразработок и изменений гидрологического режима в районе оз. Колдычевское произошли сукцессионные изменения, приведшие к полной перестройке состава высшей водной растительности.

Озеро Свитязь входит в состав республиканского ландшафтного заказника «Свитязянский», созданного в 1970 г., и является местобитанием ещё двух редких водных растений: *Lobelia dortmanna* L. – вид, находящийся на грани исчезновения (I категория (CR) национальной природоохранной значимости) и *Isoetes lacustris* L. – исчезающий вид (II категория (EN)). Несмотря на статус особо охраняемой природной территории, оз. Свитязь подвергается значительному рекреационному воздействию, интенсивность которого постепенно возрастает. Это связано с несколькими факторами: отсутствием в непосредственной близости природных водоёмов с сопоставимым уровнем привлекательности (наличие удобных береговых участков и выраженная песчаная литораль, близость транспортного сообщения). Дополнительно, в последние десятилетия наблюдается тенденция к росту летних температур и увеличению количества жарких дней, что способствует более длительному и массовому посещению озера в тёплый сезон. В совокупности эти факторы формируют высокую социально-рекреационную значимость озера, оказывающую давление на его экосистему и, как следствие, способствуют ускорению процессов эвтрофикации, что негативно сказывается и на состоянии популяции *L. uniflora* и других редких видов. Без принятия более жёстких мер по охране и восстановлению экосистемы озера уникальность этого природного объекта может быть утрачена в ближайшем будущем.

Цель исследования – оценить тенденции динамики состояния популяции *L. uniflora* и характеристики среды её произрастания в озере Свитязь, предложить меры по их охране и восстановлению.

Объекты и методы исследования

Исходными данными для проведения исследований послужили результаты натуральных наблюдений в рамках мониторинга растительного мира Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь (далее – НСМОС) в 2000 г. [6], справочные материалы [7], а также собственные полевые исследования авторов, выполненные в 2007, 2013, 2023 гг.

При выполнении геоботанических описаний использовались следующие методы:

- маршрутный, основанный на серии временных пунктов наблюдений (далее – ВПН) размером 10×20 м, заложенных последовательно вдоль всей береговой линии (всего 226 ВПН), а также подводной съёмки путём оплыва озера дайверами по линии распространения *L. uniflora* (рис. 1);

- метод пробных площадок (30 площадок размером 1×1 м), применяемый на постоянном пункте наблюдения (далее – ППН), расположенном в наиболее репрезентативной части озера (рис. 1, см. цв. вкладку V), для выполнения программы мониторинга охраняемых видов растений НСМОС в отношении *L. uniflora*. ППН включён в сеть НСМОС Республики Беларусь с 2007 г.

Все показатели высшей водной растительности, включая охраняемые виды, оценивались по единой методике мониторинга в соответствии с [8, 9]. Для анализа изменения обилия видов применялась шкала Друде с сопоставлением данных на ВПН за 2013 и 2023 гг. Жизнеспособность популяции *L. uniflora* изучалась на ППН в 2007, 2013 и 2023 гг. Полевые наблюдения проводились в период максимального развития биомассы и цветения – с июля по август.

Определение границы распространения *L. uniflora* в глубине озера осуществлялось с использованием GPS-приёмника с привлечением дайверов. В прибрежной зоне граница определялась при маршрутном обходе береговой линии методом учёта растений на ВПН.

Батиметрическая съёмка проводилась с помощью эхолота-картплоттера Garmin GPSMAP. На основе полученных данных съёмки в программе Google Earth Pro построены батиметрическая схема и 3D-модель рельефа дна озера. Картограмма зарастания озера выполнена в программе QGIS Desktop v. 3.40.

Отбор проб воды и анализ физико-химических параметров (прозрачность, со-

держание биогенных элементов и основных ионов минерального состава, рН, цветность) выполнялись согласно общепринятым методикам [10, 11].

Анализ динамики состояния и распространения *L. uniflora*, а также среды её произрастания, базировался на сравнении с результатами, полученными ранее другими исследователями [12–14], что позволило сделать выводы о существующих трендах.

Результаты и обсуждение

По итогам обобщённого анализа оригинальных наблюдений и литературных данных [3, 12, 15, 16] вид *L. uniflora* можно охарактеризовать следующими морфологическими и эколого-биологическими признаками: это небольшой водный многолетник высотой от 2 до 15 см с ползучими побегами, укореняющимися в узлах, образующий розетки из 3–9 мясистых прикорневых листьев (рис. 2а, см. цв. вкладку V); растёт преимущественно на дне, где не цветёт, используя в основном вегетативное размножение [12]; массовое цветение наземных форм отмечается при падении уровня воды [12] в засушливый период на побегах, оторвавшихся от дна и укоренившихся в обнажённой части литорали (рис. 2б, см. цв. вкладку V) и/или на прошлогодних плавающих стеблях тростника; цветёт в мае-июле; плоды образуются крайне редко [16] в августе-сентябре [3]; относится к полусветовым растениям, способным развиваться как при полном освещении, так и в условиях частичного затенения [15]; чувствителен к качеству воды, особенно к её прозрачности [16]; обладает высокой конкурентоспособностью, образуя местами подводные «луга» (рис. 2г, см. цв. вкладку V); плохо переносит вытаптывание, образуя оголённые от растительности участки в местах активного отдыха; глубина произрастания зависит от прозрачности воды. Это декоративное водное растение, культивирование которого возможно в аквариумах и оранжереях [16]. Литературные данные о культивировании вида в Беларуси отсутствуют.

Озеро Свитязь располагается в западной части Беларуси, в бассейне р. Неман. По положению в гидрографической сети, характеру питания и стока озеро принадлежало к сточным водоёмам: ранее на востоке из озера вытекал р. Своротва. Однако в связи со снижением уровня воды в 2023 г. сток из озера отсутствовал. Зарастание русла реки растительностью свидетельствует о продолжительном периоде

И. П. Вознячук, Н. Д. Грищенко, Н. Л. Вознячук
 «Мониторинг популяции прибрежницы одноцветковой и среды её произрастания в озере Свитязь (Республика Беларусь)». С. 217.

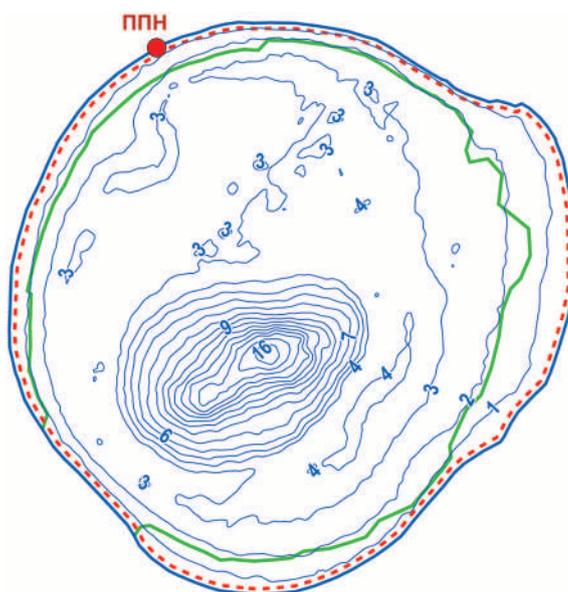


Рис. 1. Батиметрическая схема оз. Свитязь. Красная пунктирная линия – серия временных пунктов наблюдений, зелёная линия – маршрут подводной съёмки по границе распространения *L. uniflora*
 Fig. 1. Bathymetric chart of Lake Svityaz. Red dotted line indicates a series of observations points, green line – underwater survey route along the *L. uniflora* distribution boundary

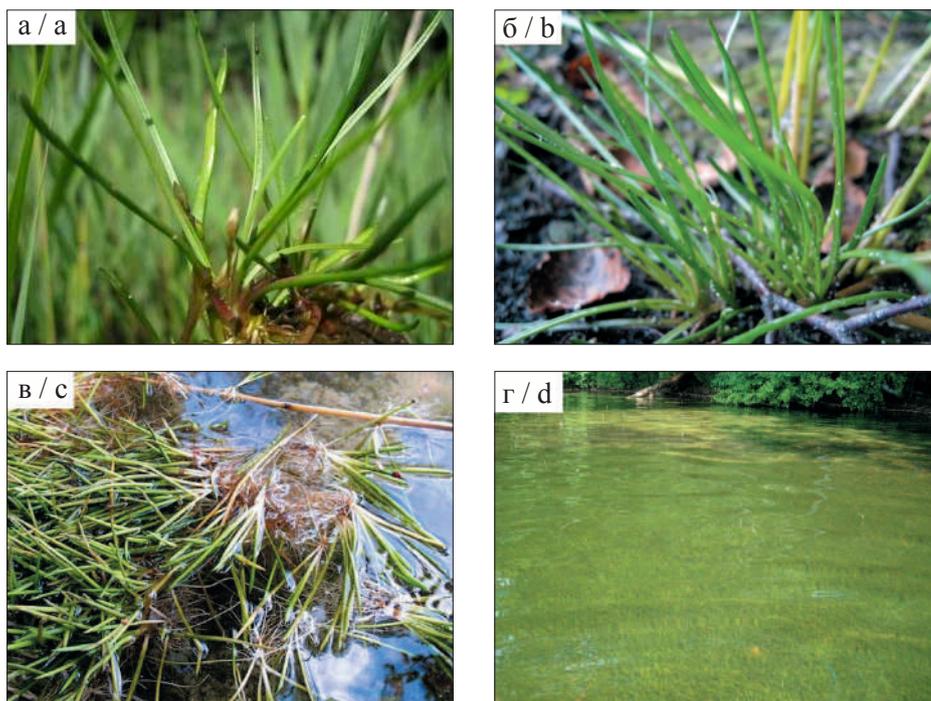


Рис. 2. *Littorella uniflora* в естественной среде произрастания (оз. Свитязь): а – в стадии цветения; б – в обнажённой части прибрежной линии; в – особи, выброшенные волной; г – подводные «луга»
 Fig. 2. *Littorella uniflora* in the natural environment (Lake Svityaz): a – in the blossom; b – in the exposed part of the coastal line; c – individuals ejected by the wave; d – underwater “meadows”

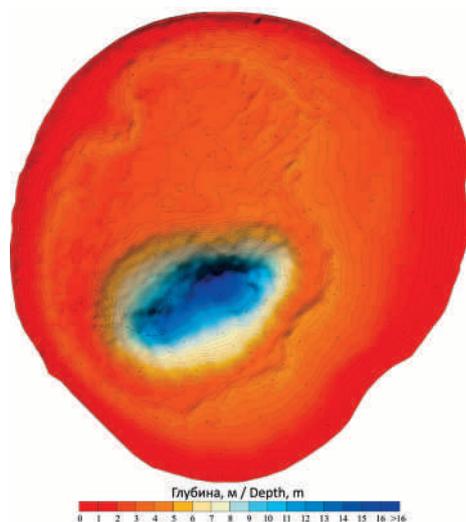


Рис. 3. 3D-модель рельефа дна озера Свитязь
Fig. 3. 3D-model of Lake Svityaz bottom relief

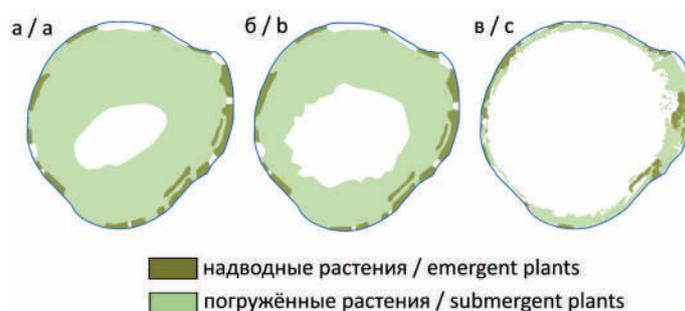


Рис. 7. Динамика изменения зарастания озера Свитязь:
а) в 1981 г. [21], б) в 2000 г. [13, 21], в) в 2023 г.
Fig. 7. Dynamics of overgrowing change in Lake Svityaz:
a) in 1981 [21], b) in 2000 [13, 21], c) in 2023



Рис. 8. Последствия эвтрофирования озера Свитязь: а – зарастание литорали тростником, б – «цветение» воды у кемпинга на северо-западном берегу
Fig. 8. Eutrophication consequences in Lake Svityaz: a – littoral overgrowth with reeds, b – water “blooming” at the campsite on the northwest shore

отсутствия стока. Впадающие водотоки отсутствуют. Основными составляющими водного баланса являются осадки, выпадающие на зеркало водоёма, подземный приток и сток, испарение. Площадь водосбора (без площади озера) составляет 2,77 км² [7]. Практически всю его территорию занимает лес.

Площадь озера – 1,76 км², объём воды – 6,1 млн. м³ [7]. Береговая линия плавная, длиной 4,8 км. Берега на всём протяжении низкие, сложены песком, покрыты лесом, на отдельных участках заняты пляжами. Котловина озера суффозионно-карстового происхождения имеет округлую форму. Подводная её часть отличается простым воронкообразным строением с хорошо выраженными морфологическими элементами (рис. 3, см. цв. вкладку VI). По всему периметру озера отчётливо выражена пологая песчаная литораль (прибрежное мелководье до глубины 2 м) (рис. 1), занимающая около 25 % площади озера. Литораль сменяется пологим сублиторальным склоном, сложенным опесчаненным илом. Профун-

даль озера мелководная, в центральной части осложнена воронкообразным понижением, к которому приурочена максимальная глубина – 16,3 м (по данным эхолокационной съёмки 2023 г.). Средняя глубина составляет 3,5 м. Согласно классификации О.Ф. Якушко [17], оз. Свитязь относится к мезотрофным, среднеглубоким водоёмам.

Важным параметром, характеризующим водную экосистему, является удельная водообменность (отношение объёма водной массы в озере к объёму годового притока). Этот показатель приближённо указывает, за сколько лет происходит полный обмен водной массы в озере. Озеро Свитязь отличается замедленным водообменом (примерно 10 лет) [7] и автохтонностью процессов водного режима.

По ряду гидрохимических признаков (низкая минерализация воды, кислая реакция среды) озеро можно отнести к редкому для Беларуси ацидотрофному типу. По данным трёх циклов мониторинга и литературных

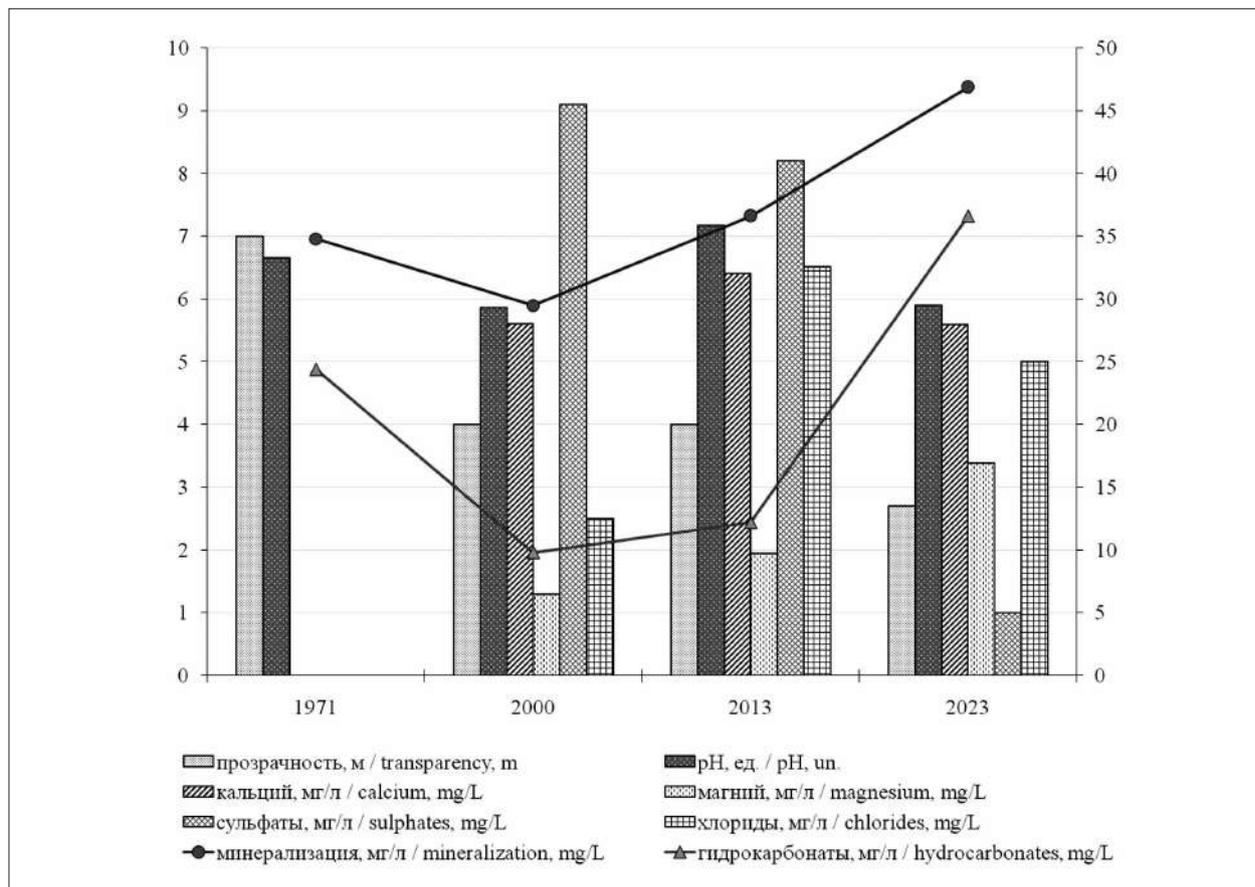


Рис. 4. Динамика показателей водной массы озера Свитязь: значения столбцов – по левой оси, значения линий – по правой оси.
 Примечание: в 1971 г. содержание кальция, магния, сульфатов, хлоридов не определялось
Fig. 4. Dynamics of water mass parameters of Lake Svityaz: column values – on the left axis, line values – on the right axis.
 Note: the content of calcium, magnesium, sulfates, and chlorides was not determined in 1971

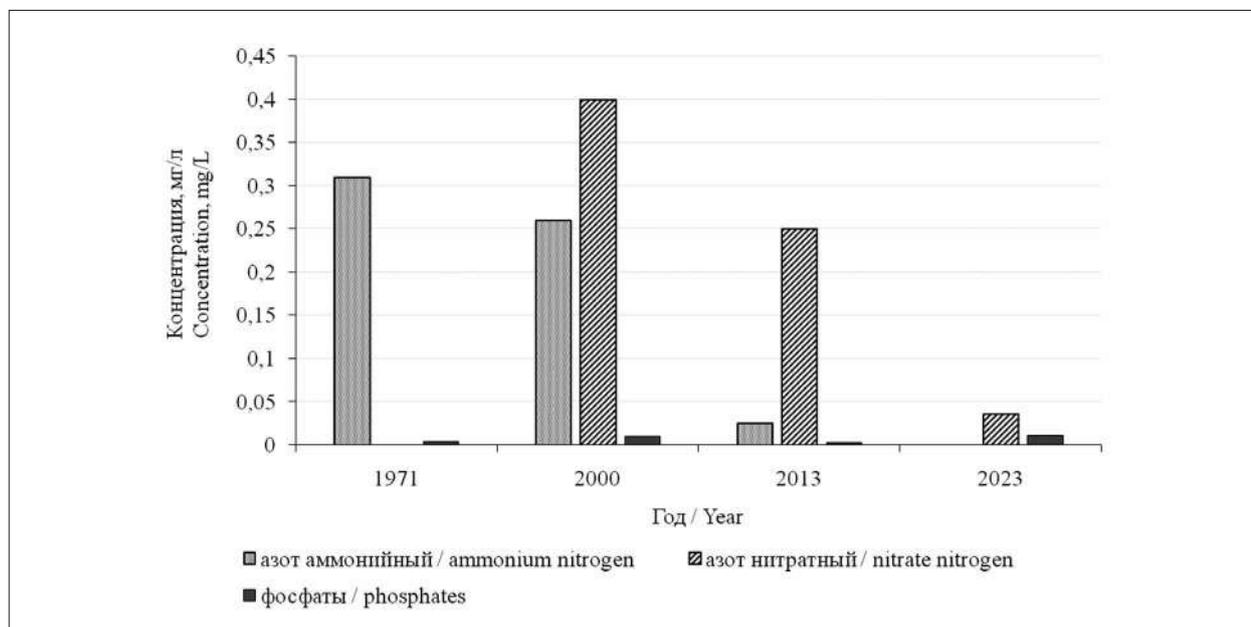


Рис. 5. Динамика содержания биогенных элементов в поверхностном слое воды озера Свитязь.

Примечание: в 1971 г. содержание азота нитратного не определялось

Fig. 5. Dynamics of biogenic elements content in the surface water of Lake Svityaz.

Note: nitrate nitrogen content was not determined in 1971

источников [7, 18, 19] отмечены изменения состава воды в озере, которые свидетельствуют об ухудшении его экологического состояния. Так, общая минерализация за последние 23 года увеличилась в 1,5 раза (рис. 4). При этом, рост произошёл в первую очередь за счёт зонального для гумидной зоны умеренного пояса гидрокарбонат-иона, произошла трансформация класса вод из сульфатного в гидрокарбонатный. Причиной может являться в том числе ухудшение кислородного режима: вследствие недостатка растворённого кислорода сульфаты перешли в сульфидную форму, сформировалась сероводородная зона в гипolimнионе [18, 19].

В многолетнем разрезе прослеживается тенденция к снижению содержания биогенных элементов в поверхностном слое воды (рис. 5). Причиной, очевидно, является более массовое развитие фитопланктона, что подтверждается полным отсутствием аммонийной формы азота и крайне низкими концентрациями азота нитратного и фосфатов при последнем обследовании. Процессы стремительного эвтрофирования выражаются и в значительном сокращении прозрачности воды с 7,0 м в 1971 г. до 2,7 м в 2023 г., что соответствует её величине в эвтрофных озёрах.

Подтверждением ухудшающегося состояния озера является и тот факт, что в июле 2024 г. в озере был введён запрет на купание [20]: лабораторные исследования

воды, проведённые Новоградским зональным центром гигиены и эпидемиологии, показали несоответствие гигиеническим нормативам по индикаторному микробиологическому показателю – кишечная палочка *E.coli*.

Для озёр ацидотрофного типа характерно слабое развитие гидробионтов: видовой состав беден, а продукция низкая. Тем не менее, такие водоёмы являются местами обитания редких и охраняемых видов флоры и фауны. Преобладает в них полностью погружённая растительность, заросли надводных растений как правило разреженные. В оз. Свитязь основной ценозообразователь полосы надводных растений – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. (табл. 1) – образует прерывистую полосу шириной 20–30 м (до 100 м вдоль восточного берега). Заросли *P. australis*, как правило, негустые, с динамикой увеличения плотности к моменту последнего обследования. Средняя высота растений составляет 1,7 м, в отдельных местах достигает 2,5 м. Растения с плавающими листьями (*Potamogeton natans* L., *Polygonum amphibium* L.) встречаются фрагментарно, отдельной полосы зарастания не образуют.

Учёт на ВПН, проведённый в 2013 и 2023 гг. при обходе озера по периметру, выявил общий тренд снижения обилия всех охраняемых видов растений в прибрежной части литорали (шириной 10 м от береговой линии) и увеличения доли других видов (*Eleocharis palustris*

Таблица 1 / Table 1

Встречаемость видов водных растений в озере Свитязь
Aquatic plant species occurrence in Lake Svityaz

Виды / Species	Встречаемость / Occurrence		
	2000 [13]	2013	2023
<i>Eleocharis palustris</i> (L.) Roem. & Schult.	++	++	+++
<i>Elodea canadensis</i> Michx.	++++	++	–
<i>Isoëtes lacustris</i> L.*	++	++	++
<i>Littorella uniflora</i> (L.) Aschers.*	++++	++++	++++
<i>Lobelia dortmanna</i> L.*	+++	+++	+++
<i>Nitella gracilis</i> (J.E. Smith) C.Agardh*	+	–	–
<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	++++	++++	++++
<i>Polygonum amphibium</i> L.	+	+	++
<i>Potamogeton compressus</i> L.	++	–	–
<i>Potamogeton crispus</i> L.	+	–	–
<i>Potamogeton lucens</i> L.	++	++	–
<i>Potamogeton natans</i> L.	+	+	++
<i>Potamogeton praelongus</i> Wulfen	+++	++	–
<i>Schoenoplectus lacustris</i> (L.) Palla	+	+	++

Примечание: * – виды, включённые в Красную книгу Республики Беларусь (постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь от 14.03.2025 № 10). Встречаемость: +++++ доминирует, +++ часто, ++ редко, + единично, – отсутствует.

Note: * – species in the Red Data Book of the Republic of Belarus (decree No. 10 of the Ministry of natural resources and environmental protection of the Republic of Belarus, 14 March 2025). Occurrence: +++++ dominant, +++ common, ++ rare, + single, – none.

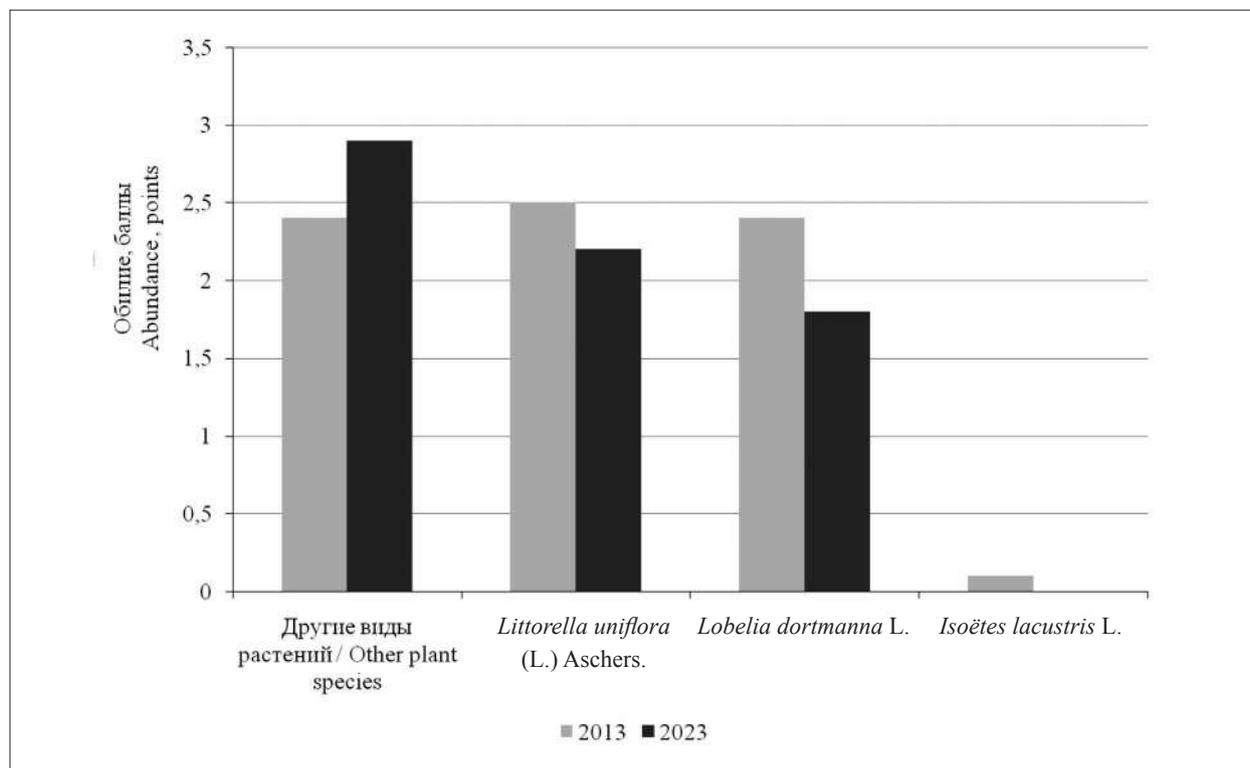


Рис. 6. Динамика показателей обилия (1–6 баллов по шкале Друде) охраняемых и других видов высших водных растений в прибрежной зоне озера Свитязь
Fig. 6. Dynamics of abundance indicators (1–6 points on the Drude scale) of protected and other species of aquatic plants in the near-shore zone of Lake Svityaz

(L.) Roem. & Schult., *P. amphibium* и *P. natans*) (рис. 6).

Внутренняя граница распространения растений *L. uniflora*, установленная с помощью GPS-приёмника по линии их распространения в глубине озера при двух циклах мониторинга, колеблется в пределах погрешности измерений и, в основном, проходит по 2-метровой изобате (см. рис. 1), с разрывами в районах организации пляжей и плотных зарослей *P. australis*.

Сравнительный анализ полученных данных с литературными [12, 13, 17, 21] показал, что в целом глубина максимального произрастания погружённых растений сократилась с 7,0 до 2,5 м (рис. 7, см. цв. вкладку VI). Сокращение произошло за счёт выпадения из подводного растительного покрова водного мха *Fontinalis antipyretica* Hedw., произраставшего по данным исследований 1980-х гг. на глубинах до 7,0 м [17], а также *E. canadensis* и рдестов на глубинах 2,0–4,5 м, по данным 2000 г. [13]; не подтверждено произрастание охраняемых видов – *Caulinia flexilis* Willd. и *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle, которые упоминались при обследовании озера в 1990-х гг. [13] и 2015–2016 гг. (только *C. flexilis*) [14]; сократился ареал произрастания *I. lacustris*, а полоса *L. uniflora* подверглась фрагментации. По результатам наблюдений в 2023 г. прогрессирует зарастание литоральной части озера *P. australis*, наблюдается массовое развитие фитопланктона (с преобладанием зелёных водорослей) и нитчатых водорослей-обрастателей в местах, примыкающих к туристическим стоянкам (рис. 8, см. цв. вкладку VI).

Ранее основная продукционно-деструкционная функция в экосистеме водоёма принадлежала полностью погружённым растениям, степень развития которых определяла качество воды в озере [13]. Изменения гидрохимических показателей, снижение

прозрачности воды, заиление грунта способствуют зарастанию литоральной части водоёма тростником, структурной перестройке в видовом составе растительных сообществ в сторону гелофитной растительности, пояс же гидрофитной растительности стремительно деградирует. Так, ещё в 2000 г. озеро относилось к рдестовому подтипу гидрофитного типа зарастания [13], в 2013 г. – к полушниковому подтипу, в скором времени не исключён переход в гело-гидрофитный тип зарастания.

Непосредственный анализ состояния популяции *L. uniflora*, проведённый на ППН в 2007, 2013 и 2023 гг., демонстрирует высокие показатели жизнеспособности популяции в части её численности, занимаемой площади, способов размножения и мощности особей. Однако, при этом выявлено, что проективное покрытие вида в 2023 г. составило всего 44,7 %, что на 13,6 % меньше по сравнению с данными 2007 г. (табл. 2). В то же время проективное покрытие других видов на этих же площадках увеличилось на 32,7 %. Снижение проективного покрытия *L. uniflora* на ППН связывается с активным разрастанием таких видов, как *Schoenoplectus lacustris* (сор3, обилие по Друде), *E. palustris* (сор2), *P. natans* (сор2) и *P. australis* (сор1).

Такая динамика частично объясняется значительным понижением уровня воды в озере: если в 2007 г. граница распространения вида на ППН находилась в 6 м от береговой линии, то в 2023 г. она сместилась до 14 м, при снижении уровня воды с 46,0 до 25,7 см на учётных площадках. По сравнению с предыдущими данными, высота особей увеличилась на 1,8 см, а количество листьев в розетке уменьшилось примерно на один лист. Увеличение высоты растений на 25 % можно объяснить снижением прозрачности воды, что стимулирует их вытягиваться к свету для повышения фотосинтетической активности.

Основной причиной ухудшения состояния популяции *L. uniflora* и деградации экологи-

Таблица 2 / Table 2

Основные показатели жизнеспособности популяции *L. uniflora* на ППН мониторинга
L. uniflora population vitality indicators at the regular monitoring observation point

Показатели, ед. / Indicators, units	Год / Year		
	2007	2013	2023
Проективное покрытие вида, % / Species projective cover, %	58,3	28,0	44,7
Общее проективное покрытие водных растений, % General projective cover by water plants, %	23,6	26,5	56,3
Высота побегов, см / количество листьев, шт. Shoots height, cm / leaves amount, pieces	7,3 / 5,8	11,1 / 5,0	9,1 / 4,9
Повреждённость растений, балл / Plant damage, point	0	0	0
Средняя высота воды на ППН, см / Average height of water, cm	46,0	42,5	25,7

ческого состояния озера в целом является усиление рекреационной нагрузки. Между двумя циклами мониторинга отмечено существенное увеличение антропогенного давления на участок оборудованного пляжа, расположенного со стороны автомобильной дороги, где зона прямого воздействия охватывает 340 м длины береговой линии. Кроме того, наблюдается активное привлечение большого количества отдыхающих в кемпинг в северо-западной части прибрежной зоны. Помимо прямого поступления биогенных веществ от купающихся, недостаточный уровень экологического просвещения населения приводит к тому, что мытьё посуды и гигиенические процедуры с использованием синтетических поверхностно-активных веществ часто осуществляются непосредственно в водоёме, несмотря на наличие туалетов и душевых, расположенных в соответствии с нормативами на расстоянии 50 м от берега вглубь территории. В целом, протяжённость мест захода в воду вдоль всей береговой линии за 10-летний период увеличилась вдвое: на момент исследования их общая длина достигла 1166 м (табл. 3), что составляет около 24 % от общей протяжённости береговой линии.

Спад уровня воды в озере и изменения её химического состава, обусловленные биогенной нагрузкой, проявились в удвоении протяжённости тростниковых зарослей, которые теперь занимают 52 % береговой линии. Также наблюдается появление «цветения» воды, что не фиксировалось в предыдущие периоды мониторинга. Ранее также не регистрировалось наличие пластиковой посуды, которая в 2023 г. единично или небольшими скоплениями отмечена в наиболее густых тростниковых зарослях на участке 20 ВПН, что в совокупности охватывает 400 м береговой линии (табл. 3). Кроме этого, вдоль 200-метрового участка литоральной зоны экологическая ситуация усугубляется массовым валежом деревьев, вызванным деятельностью бобров, здесь формируются застойные участки и выражены признаки «цветения» воды.

Для сохранения *L. uniflora* в естественной среде произрастания первоочередной задачей является оптимизация условий произрастания вида в оз. Связь путём снижения рекреационной нагрузки. Предлагаемые меры:

- определение лимита по допуску неорганизованных отдыхающих в соответствии с расчётной допустимой фосфорной нагрузкой на озеро, обеспечивающей сохранение его экологического статуса согласно модели Р. Фолленвайдера [22, 23]. В соответствии с этим предложены следующие ограничения по посещению озера: 1) не более 150 человек в сутки в период с июня по август, либо 2) до 500 человек в сутки при допуске исключительно в выходные дни в летний период (июнь-август). Общее количество посетителей за сезон не должно превышать 13 000 человек.

Согласно данным систематических наблюдений (дважды в неделю с июля 2018 г. по январь 2019 г., включая выходные дни), полученным С. А. Стенько [24], среднее количество отдыхающих в день составляло около 6000 человек в июле и 4000 человек в августе. При этом, максимальная рекреационная нагрузка, рассчитанная на основе вместимости двух автомобильных парковок у озера (1450 машино-мест), оценивается в 7250 человек [24].

Регулирование количества отдыхающих может осуществляться путём организации пунктов регистрации и контроля их количества, разработки системы выдачи путёвок, учёта и регулирования туристического потока, установки шлагбаумов на подъездах к озеру и др.;

- оборудование мест скопления отдыхающих достаточным количеством мусорных контейнеров и биотуалетов;

- перемещение зоны кемпинга на северо-западном берегу ближе к стационарным санитарным узлам (туалетам и душевым), удалив её на расстояние 50 м от берега, вглубь лесного массива;

- установка информационных щитов, содержащих предостережения о недопустимости

Таблица 3 / Table 3

Основные показатели, отражающие степень нагрузки на озеро Свитязь
Key indicators identifying the load degree on Lake Svityaz

Год Year	Протяжённость вдоль береговой линии, м / Length along the coastline, m				
	пляж beach	тростник reed	захламлённость валежником fallen trees	бытовой мусор waste	«цветение» воды water “blooming”
2013	571	1240	нет / not found	нет / not found	нет / not found
2023	1166	2500	200	400	780

загрязнения водоёма, запрете на мытьё посуды и использование моющих средств;

- проведение периодического выкашивания зарослей тростника с целью снижения содержания биогенных веществ в воде и донных отложениях, улучшения кислородного режима, предотвращения процессов заиления и образования застойных участков;

- своевременная уборка поваленных деревьев и предотвращение захламления литоральной зоны валежником и её заиления в результате деятельности бобров путём их переселения;

- проведение ежегодного мониторинга качества воды для своевременной корректировки мероприятий по восстановлению оз. Свитязь.

Заключение

В настоящее время состояние оз. Свитязь характеризуется признаками деградации, снижением биологического разнообразия и ухудшением условий произрастания водных растений. Анализ данных за последнее десятилетие, подтверждённый двумя циклами мониторинга и сопоставленный с ранними исследованиями, свидетельствует о выраженном эвтрофировании водоёма, деградации полосы погружённой растительности и снижении обилия *L. uniflora*.

Показатели минерализации воды увеличились в 1,5 раза. Зафиксирован дефицит растворённого кислорода, а в гипolimнионе сформировалась сероводородная зона. Вследствие активного развития фитопланктона наблюдается тенденция к снижению концентрации биогенных элементов в поверхностных слоях воды. Прозрачность воды значительно уменьшилась – с 7 м (до 1990 г.) до 2,7 м в 2023 г. В прибрежных зонах, прилегающих к кемпингу, отмечается сильное «цветение» воды.

Видовой состав водной растительности беден и сокращается с каждым циклом мониторинга: если в 2000 г. он включал 14 видов, в 2013 г. – 11, то в 2023 г. – всего 8 видов. Основные изменения связаны с перестройкой растительных сообществ в сторону гелофитной растительности: протяжённость тростниковых зарослей за 10 лет увеличилась вдвое и сейчас составляет 52 % общей длины береговой линии; при этом возросла их плотность, а роль полностью погружённых растений значительно снизилась.

В подводном растительном покрове сохраняется преобладание *L. uniflora* как в виде чистых сообществ на глубинах 1–2 м, так и

смешанных с *L. dortmanna* на глубинах до 1 м. При этом отмечается общий тренд снижения численности охраняемых видов, сопровождаемый увеличением доли таких видов, как *E. palustris*, *P. amphibium* и *P. natans*.

Внутренняя граница распространения *L. uniflora* за два цикла мониторинга (2013 и 2023 гг.) колебалась в пределах погрешности измерений и в основном проходит по 2-метровой изобате с проективным покрытием от 20 до 100 %, за исключением участков с пляжами и плотными зарослями *P. australis*.

За период наблюдений максимальная глубина произрастания водных растений снизилась с 7,0 до 2,5 м за счёт выпадения из подводного растительного покрова *F. antipyretica* Hedw., *E. canadensis* и рдестов, сокращения ареала произрастания *I. lacustris*, фрагментации полосы *L. uniflora*.

Основными причинами негативных трендов являются, прежде всего, чрезмерные рекреационные нагрузки на фоне понижения уровня воды, обусловленного метеоусловиями последних десятилетий. Между двумя циклами мониторинга (2013 и 2023 гг.) отмечено существенное увеличение антропогенной нагрузки: на участке оборудованного пляжа зона прямого влияния охватывает 340 м береговой линии, в северо-западной части озера организован крупный кемпинг. В целом количество мест захода в воду возросло вдвое, достигнув 24 % протяжённости береговой линии. Кроме этого, вдоль 200-метрового участка литоральной зоны экологическая ситуация усугубляется массовым валежом деревьев, вызванным деятельностью бобров.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о необходимости внедрения комплексных мер по охране и восстановлению экосистемы озера, снижению антропогенного воздействия и повышению экологической осведомлённости заинтересованных сторон. Только системный подход позволит стабилизировать состояние водоёма и обеспечить сохранение его биоразнообразия и экологической устойчивости.

Работа выполнена в рамках задания 4 подпрограммы «Устойчивое использование природных ресурсов и охрана окружающей среды с учётом изменения климата» государственной научно-технической программы «Зелёные технологии ресурсопользования и экобезопасности» на 2021–2025 годы.

Авторы выражают искреннюю благодарность участникам экспедиций 2013 и 2023 гг., усилиями которых стало возможным получение

текущих данных о состоянии озера и объектов растительного мира – сотрудников Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси А.Н. Скуратовича, С.С. Савчука, А.В. Судника, Р.М. Голушко, сотрудников ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» Ю.Г. Лигиняка, О.И. Бородина, Е.В. Корзуна, А.Ю. Карнаеву и дайверов дайвинг-центра «Морской пегас» под руководством А.С. Лихачёва.

References

1. Red data Book of Latvia. Vascular plants / Ed. G. Andrušaitis. Riga: University of Latvia Institute of Biology, 2003. 689 p. (in Latvian).
2. Polish Red Data Book of Plants. Pteridophytes and flowering plants / Eds. R. Kaźmierczakowa, K. Zarzycki, Z. Mirek. Krakow: Instytut Ochrony Przyrody PAN, 2014. 896 p. (in Polish).
3. Red Data Book of the Republic of Belarus. Plants: rare and endangered species of wild plants / Ed. I.M. Kachanovskii. Minsk: Belarusskaya entsyklopediya imya P. Brouki, 2015. 448 p. (in Russian).
4. Dubovik D.V., Skuratovich A.N., Savchuk S.S. Protected plant species in old herbarium collections of Vilnius University // Red Data Book of the Republic of Belarus: status, problems, prospects: materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Vitebsk: VGU imeni P.M. Masherova, 2011. P. 51–54 (in Russian).
5. Pachoskii I.K. Flora of the Polesie and surrounding areas. St. Peterburg: V. Demakov tipographiya, 1899. V. 29. No. 3. 260 p. (in Russian).
6. Vlasov B.P., Hryshchankava N.D., Rudakovskiy I.A. Aquatic vegetation monitoring database: special scientific data set. Registration Certificate: 1341001037, 02.09.2010 [Internet resource] <https://xn----ctbjlqxdiff1ap0a4fi.xn--90ais/register-information-resources/detail/5803/> (Accessed: 04.03.2026) (in Russian).
7. Vlasov B.P., Yakushko O.F., Gigevich G.S., Rachevskiy A.N., Loginova E.V. Lakes of Belarus: handbook. Minsk: Minsktipproekt, 2004. 284 p. (in Russian).
8. Methodology of vegetation monitoring within the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus / Ed. A.V. Pugachevskiy. Minsk: Pravo i ekonomika, 2011. 165 p. (in Russian).
9. Katanskaya V.M. Methodology for the study of higher aquatic vegetation // Life of fresh waters of the USSR / Eds. E.N. Pavlovskiy, V.I. Zhadin. Moskva, Leningrad: Akademiya nauk SSSR, 1956. V. 4. Part 1. P. 160–182 (in Russian).
10. Methodological guidelines on the principles of organizing a system of monitoring and control of water quality in water bodies and streams on the Goskomhydromet network within OGSNK. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984. 40 p. (in Russian).
11. Manual of chemical analysis of land surface waters / Ed. A.D. Semenov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977. 292 p. (in Russian).
12. Vynaev G.V., Gigevich G.S., Dubovik D.V. New and controlled locations of rare species of higher aquatic plants in Belarus // Red Book of the Republic of Belarus: status, problems, prospects: materialy Respublikanskoy nauchnoy konferentsii. Vitebsk: VGU imeni P.M. Masherova, 2002. P. 64–65 (in Russian).
13. Gigevich G.S., Vlasov B.P., Vynaev G.V. Higher aquatic plants in Belarus: ecological and biological characteristics, use and protection. Minsk: BGU, 2001. 231 p. (in Russian).
14. Grummo D.G., Zelenkevich N.A., Sozinov O.V., Moiseichik E.V. Vegetation of the republican landscape reserve “Svityazyansky” // Vestnik Hrodzenskaha Dziarzhavnaha Universiteta Imia Ianki Kupaly. Seryia 5. Ekanomika. Satsyialohiia. Biialohiia. 2021. V. 11. No. 3. P. 99–115 (in Russian).
15. Ellenberg H., Weber H. E., Düll R. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. 2 Auflage // Scripta Geobotanica. 1992. Bd. 18. 258 p. (in German).
16. Red Data Book of the Russian Federation (plants and fungi) / Ed. Yu.P. Trutnev. Moskva: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2008. 855 p. (in Russian).
17. Yakushko O.F., Myslivets I.A., Rachevskiy A.N. Lakes of Belarus. Minsk: Uradzhai, 1988. 214 p. (in Russian).
18. Sukhovilo N.Yu., Moroz A.I., Zankevich D.L. Hydrochemical regime of the Lake Svityaz in conditions of climate change and anthropogenic load // Climate change and “green” technologies in landscape environment: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Groznyi: Izdatelstvo FGBOU VO “Chechenskii gosudarstvennyi universitet im. A.A. Kadyrova”, 2022. P. 136–142 (in Russian). doi: 10.36684/72-1-2022-136-142
19. Sukhovilo N.Yu., Maroz A.I., Novik A.A., Vlasova D.B. Hydrochemical regime of Belarus acidotrophic lakes under conditions of climatic changes and anthropogenic load // Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology. 2023. No. 2. P. 58–69 (in Russian).
20. On the suspension of swimming for children and adults in the waters of Lake Svityaz and the reservoir along Drozdovich Street [Internet resource] <https://novge.by/обучреждении/новости-учреждения/document-9593.html> (Accessed: 18.04.2025) (in Russian).
21. Monitoring of flora in the Republic of Belarus: results and prospects / Eds. A.V. Pugachevskiy, A.V. Sudnik. Minsk: Belaruskaya navuka, 2019. 491 p. (in Russian).
22. Vollenweider R.A. Input–output model // Schweiz. Z. Hydrologie. 1975. V. 37. No. 1. P. 53–84. doi: 10.1007/BF02505178
23. Vlasov B.P., Vitchenko A.N., Gagina N.V., Hryshchankava N.D. Geoecological assessment of the natural resource potential of anthropogenically disturbed lake basins: methodological recommendations. Minsk: BGU, 2015. 44 p. (in Russian).
24. Stenko S.A., Kopitsya V.N. Calculation of the permissible recreational load on the territory of the landscape reserve of republican significance “Svityaz” // Sakharov readings 2019: environmental problems of the XXI century: materialy 19 Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Minsk: IVTs Minfina, 2019. V. 3. P. 90–93 (in Russian).

Поддержание экологических инициатив коммерческими банками России в рамках реализации принципов экологической, социальной и корпоративной ответственности

© 2026. Е. В. Каранина, д. э. н., профессор,
В. Н. Пугач, к. э. н., ректор,
А. В. Котанджян, к. э. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: asyaviva@yandex.ru

В рамках данной статьи проведён анализ реализации принципов экологической, социальной и корпоративной ответственности (ESG-принципов) в деятельности коммерческих банков страны, рассмотрены примеры и показатели крупнейших банков страны касательно реализации принципов «зелёной» экономики сквозь призму развития ESG-банкинга. Целью настоящей работы является обозначение и анализ основных проблем реализации ESG-стратегии в банковском секторе России, а также возможности оценки уровня проникновения ESG-принципов в деятельность коммерческих банков в контексте поддержания современных экологических подходов к организации финансово-хозяйственной деятельности. ESG-повестка в России привлекла внимание общественности после анонса проекта трансграничного углеродного регулирования Европейским союзом. В мае 2020 г. Европейский Центральный банк и Банк России обнародовали новую позицию и планы по регулированию и надзору ESG-рисков в процессе деятельности финансовых учреждений. Так, Центральными банками было инициировано создание Группы по регулированию «зелёной» экономики, деятельность которой подконтрольна надзорным органам. Группой было выпущено руководство, служащее инструкцией по устойчивому и ответственному инвестированию, а также управлению банковскими портфелями. При этом важным представляется поиск оптимального баланса направлений финансовой и экологической политики страны, который способствовал бы реализации интересов отмеченных направлений без ущерба одной из них. Существует потребность в постоянном мониторинге результатов внедрения ESG-принципов и унификации модели оценки показателей, а также в определении роли государства и банковского сектора в развитии «зелёной» экономики.

Ключевые слова: экологическая, социальная и корпоративная ответственность (ESG), ESG-принципы, ESG-банкинг, ESG-стратегия, экологические принципы, устойчивое развитие банковского сектора, «зелёная» экономика.

Supporting environmental initiatives by Russian commercial banks within the framework of implementing the principles of environmental, social and corporate responsibility

© 2026. E. V. Karanina ORCID: 0000-0002-5439-5912[?]
V. N. Pugach ORCID: 0000-0003-1220-4062[?]
A. V. Kotandzhyan ORCID: 0000-0002-2043-1356[?]
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: asyaviva@yandex.ru

This article analyzes the implementation of environmental, social, and corporate responsibility (ESG) principles in the activities of the country's commercial banks, and examines examples and indicators of the country's largest banks regarding the implementation of "green" economy principles through the prism of ESG banking development. The aim of this article is to identify and analyze the main problems of implementing an ESG strategy in the Russian banking sector, as well as the possibility of assessing the level of ESG principles penetration in the commercial banks activities in the context of maintaining modern environmental approaches to organizing financial and economic activities. Reports on the sustainable development of Russian large commercial banks, as well as scientific and analytical publications on the implementation of the "green" economy principles were used as an information base for the analysis. Recently, the implementation of sustainable development goals agenda has become increasingly relevant. This creates challenges for the corporate sector. International companies are actively implementing ESG principles in their operations and recognize

the importance of ESG risk management. Russian ESG agenda attracted public attention after the announcement of the EU cross-border carbon regulation project. In 2021, there was an active development of ESG practices and responsible financing instruments in Russia. In May 2020 the European Central Bank and the Central Bank of Russia announced a new position and plans for regulating and supervising the ESG risks in the financial activities process. Thus, the “Green” Economy Regulatory Group (GERG) was created. Supervisory authorities regulate the GERG’s activities. The GERG issued a guide on sustainable and responsible investment, as well as banking portfolios management. At the same time, it is important to find an optimal balance between the areas of the country’s financial and environmental policies, which would promote the implementation of the interests in the noted areas without compromising one of them. There is a need to monitor the results of ESG-principles implementation, to unify the model for assessing indicators, as well as to determining the role of the state and the banking sector in a “green” economy development.

Keywords: environmental, social and corporate responsibility (ESG), ESG principles, ESG banking, ESG strategy, environmental principles, sustainable development of the banking sector, “green” economy.

Поддержание экологических стандартов в настоящее время является одним из факторов устойчивого развития социально-экономических субъектов. Экологическое благополучие можно представить в виде драйвера экономического роста регионов РФ, а также маркером определения уровня региональной безопасности [1]. Повышается роль соблюдения экологической повестки и промышленными предприятиями в направлении контроля утилизации отходов [2], регулирование выбросов углекислого газа в атмосферу и внедрения экологического менеджмента.

Вместе с этим экологическая повестка стала актуальным направлением и для финансового сектора экономики страны. ESG-банкинг (ESG – Environmental. Social. Governance) в современном понимании представляет собой реализацию основных **ESG-принципов: поддержка и развитие экологии, широкий спектр ответственности в социальной и управленческой сфере** [3]. При этом понятие носит собирательный характер, идейные мотивы связаны с поддержанием «этического, ответственного, устойчивого и инновационного» банкинга в противовес спекулятивному.

Кризисные явления в экономике характеризуются удорожанием финансовых ресурсов, банки-спекулянты, приобретая их, в свою очередь, переносят покрытие рисков на клиентов, повышая текущие ставки по кредитным продуктам. Банк, придерживающийся ESG-принципов, напротив, разделяет существующие риски совместно с клиентом, предоставляя ему возможность получения кредитов по адекватным ставкам, поддерживая конкурентоспособность и платёжеспособность своих клиентов. При этом банки, поддерживающие развитие «зелёной» экономики, нацелены на реализацию следующих направлений, связанных с экологическим благополучием.

1. «Зелёное» кредитование. Подразумевает точечную направленность финансирования

проектов, соответствующих ESG-принципам и поддержке «зелёной» экономики.

2. Выпуск собственных и покупка сторонних «зелёных» облигаций.

3. Реализация внутри самой структуры коммерческого банка ESG-принципов, направленных на снижение собственного углеродного следа, выбор поставщиков, придерживающихся ESG-принципов, внедрение эффективных эко-привычек в корпоративную культуру.

4. Изменение методологии оценки заёмщиков и рисков кредитования с учётом соблюдения ESG-повестки.

Также наблюдается и общее повышение количества финансовых институтов, поддерживающих и реализующих в своей деятельности ESG-принципы, и, что не менее важно, идёт активное развитие всей инфраструктуры устойчивого и ответственного финансового рынка, появляются специальные биржевые секции, происходит рейтингование лучших, появляются ESG-консультанты, формируются надзорные и контрольные институты [4].

В свою очередь и клиенты к ESG-банкам относятся наиболее благосклонно, так как их привлекает прозрачность источников происхождения средств и участие банков в решении социально-значимых проблем. Очень важно понимание самими финансовыми учреждениями преимуществ и важности соблюдения вышеобозначенных принципов, в том числе и для поддержания собственного устойчивого развития.

Исходя из имеющейся аналитики центральных банков, создавших специальную группу по регулированию «зелёной» экономики (Network for Greening the Financial System – NGFS), можно отметить, что для большинства банков раскрытие темы ESG-принципов не ограничивается только участием в обеспечении экологического благополучия, а имеет широкий спектр различных направлений, в том числе и инвестиционных.

Практика демонстрирует использование регуляторами пяти основных стратегий для возможных инвестиций собственных активов:

- отрицательный скрининг (ограничение компаний, секторов, стран);
- положительный скрининг (поддержка ESG-компаний путём вливания в них активов);
- интеграция ESG-критериев и традиционного финансового анализа при формировании портфеля инвестиций;
- инвестиции в воздействие (пропаганда ESG-принципов путём направленности инвестиций в «зелёные» и «социальные» облигации);
- голосование на основе ESG-принципов в компаниях, где центральные банки входят в органы управления.

Среди наиболее встречаемых стратегий поддержки ESG-принципов значится именно положительный скрининг [5].

В нашей стране активное развитие и внедрение в бизнес ESG-повестки началось намного позднее, нежели в западных странах. Точкой отсчёта можно считать 2020 г., когда проявилось активное давление со стороны мегарегуляторов и государства, побуждающее к реализации в бизнес-деятельности ESG-принципов. Первопроходцами по внедрению, а также системному учёту ESG-факторов в своей деятельности оказались крупные промышленные предприятия и хозяйствующие субъекты добывающей отрасли. Финансовые учреждения, будучи важнейшим звеном экономической системы, также направляют свои действия на реализацию ESG в бизнес-модели, при этом наиболее плодотворно регулируя риски.

Целью настоящей работы является обозначение и анализ основных проблем реализации ESG-стратегии в банковском секторе России, а также возможности оценки уровня проникновения **ESG-принципов в деятельность коммерческих банков** в контексте поддержания современных экологических подходов к организации финансово-хозяйственной деятельности.

Материалы и методы исследований

На текущий момент одним из проблемных вопросов реализации ESG-стратегии в деятельность коммерческих банков, как отмечают многие исследователи, является недостаточная проработка законодательной и нормативной базы в данной области.

В таблице 1 представлены национальные инициативы, которые послужили катализатором запуска EGS-банкинга в России [6].

Исходя из представленных в таблице нормативно-правовых документов, можно сделать выводы о том, что правительство страны крайне заинтересовано и предпринимает конкретные действия по созданию необходимых условий реализации EGS-принципов в российской экономике, с обязательным учётом компаниями экологических, социальных и экономических аспектов своего бизнеса.

Финансово-кредитный сектор экономики страны также нацелен на устойчивое развитие согласно международным принципам. Однако данному сектору присущи свои нерешённые проблемы, ограничивающие реализацию EGS-банкинга не только в нашей стране, но и по всему миру. Проблемы, ограничивающие развёртывание EGS-банкинга, условно можно подразделить на факторы международного характера и локальные, возникающие в результате воздействия определённых сдерживающих моментов внутри страны [6].

Так, среди объективных проблем развёртывания EGS-банкинга на глобальном уровне можно отметить следующие: отсутствие единого международного понятия ESG-банкинга, единой интерпретации ESG-рисков, единой методологии по управлению ESG-рисками, единой ESG-платформы для обмена практикой и знаниями, а также различия подходов к ESG-оценке участников финансового рынка.

Локальные ограничения развития и распространения основных направлений EGS-банкинга выражаются в следующем:

- высокая ресурсоориентированность российской экономики, не позволяющая осуществить быстрый переход без высоких финансовых затрат;
- различия между декларируемыми и реальными положениями по соблюдению ESG-принципов;
- отсутствие комплексного государственного регулирования по интеграции ESG-факторов в корпоративную деятельность банков;
- недостаток информированности среди участников рынка (как банков, так и заёмщиков) о преимуществах интеграции ESG-принципов в бизнес-модели.

Разработка определённых индикаторов и анализ успешных практик финансового сектора в направлении ESG позволят наметить пути по решению обозначенных проблем, а также предложить финансовому сектору готовые модели внедрения **ESG-практик, отмечая важность** соблюдения экологических стандартов в том числе.

Таблица 1 / Table 1

Национальные инициативы формирования EGS-банкинга и «зелёной» экономики
National initiatives for EGS-banking and “green” economy forming

Год Year	Национальные инициативы National initiatives
2016	Россия подписала Парижское соглашение по климату, направленное на борьбу с глобальным потеплением, а также предусматривающее регулирование выбросов углекислого газа в атмосферу / Russia signed the Paris Agreement on climate change, which aims to combat global warming and also provides for the regulation of carbon dioxide emissions into the atmosphere
2017	Утверждение Стратегии экологической безопасности РФ до 2025 г., целью которой является предупреждение экологических катаклизмов вследствие хозяйственной деятельности / Strategy for Environmental Safety of the Russian Federation until 2025 approval to prevent environmental disasters resulting from economic activity
2018	Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития РФ на период до 2024 года». Один из инструментов достижения целей – национальный проект «Экология» / The Russian President Decree No. 204 “On the National Goals and Strategic Objectives for the Development of the Russian Federation through 2024”, May 07, 2018. National project “Ecology” is one of the tools for achieving these goals
2019	Московская биржа и Российский союз промышленников и предпринимателей (РСПП) создали ежедневный расчёт новых индексов: индексы МосБиржи – РСПП «Ответственность и открытость» и «Вектор устойчивого развития», – с целью проведения анализа российских компаний на соблюдение ESG-принципов / Moscow Exchange (MOEX) and the Russian Union of Industrialists and Entrepreneurs (RSPP) launched a daily calculation of new indices: “MOEX – RSPP Responsibility and Transparency Index” and “MOEX – RSPP Sustainability Vector Index”, – to analyze Russian companies’ compliance with ESG principles
	ОАО «РЖД» выпустил первые «зелёные» биржевые облигации в евро / Russian Railways JSC issued its first “green” exchange-traded bonds in Euros
	Московской биржей был создан сектор устойчивого развития с целью финансирования экологических и социально значимых проектов / MOEX created a sustainable development sector to finance environmental and socially significant projects
2020	Минэкономразвития подготовило проект концепции о российской системе обращения углеродных единиц / Russian Ministry of Economic Development (MEDRF) prepared a draft concept for a Russian carbon units circulation system
	Ассоциация банков России создала проектную группу «ESG-банкинг» с целью подготовки предложений по формированию правовых основ для продвижения принципов ESG-банкинга на российском рынке / Association of Russian Banks (ASB) has created the ESG Banking project group to develop proposals for establishing a legal framework for promoting ESG banking principles in the Russian market
	Минэкономразвития создало экспертный совет по устойчивому развитию, в который входят 30 ведущих российских и зарубежных компаний / MEDRF created an expert council on sustainable development, comprising 30 leading Russian and international companies
2021	Ассоциация банков России представила «Практические рекомендации банковского сообщества по внедрению ESG-банкинга в России» / ARB presented “Practical recommendations of the banking community for the ESG-banking implementation in Russia”
2021	Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2021 № 1912-р «Об утверждении целей и основных направлений устойчивого (в том числе «зелёного») развития РФ» / Russian Government Order No. 1912-r “On approving the goals and key directions of sustainable (including “green”) development in the Russian Federation”, July 14, 2021
	Постановление Правительства РФ № 1587 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе «зелёного») развития в Российской Федерации и требований к системе верификации проектов устойчивого (в том числе «зелёного») развития в Российской Федерации» / Russian Government Resolution No. 1587 “On approval of criteria for sustainable (including “green”) development projects in the Russian Federation and requirements for the verification system for sustainable (including “green”) development projects in the Russian Federation”

Год Year	Национальные инициативы National initiatives
2022	Россия была исключена из повестки устойчивого развития, принятой в странах Европейского союза и многие её инициативы, в том числе ESG-повестка стали пересматриваться. Указанные события преобразовали вектор ESG-банкинга, изменили акценты на социальный и корпоративный секторы [7] / Russia was excluded from the sustainable development agenda adopted by the EU. Russian ESG-agenda was revised. The ESG-banking vector shifting the focus more toward the social and corporate sectors [7]
2022	Распоряжение Правительства РФ от 29.12.2022 № 4355-р «Об утверждении Стратегии развития финансового рынка РФ до 2030 года». Подчёркнута важность продолжения работы над развитием рынка устойчивого финансирования в контексте инструментов и инфраструктуры рынка, а также интеграции принципов устойчивого развития и учёта экологических, социальных и управленческих аспектов (ESG-факторов) в корпоративное управление Russian Government Order No. 4355-r “On approval of the strategy for the Russian financial market development until 2030”, December 29, 2022; emphasizes the importance of continuing to develop the sustainable finance market in the context of market instruments and infrastructure, as well as integrating sustainable development principles and environmental, social, and governance (ESG) factors into the corporate governance
2024	«Основные направления развития финансового рынка Российской Федерации на 2024 год и период 2025 и 2026 годов» (разработаны Банком России) предопределяют необходимость и готовность финансовых институтов в работе над проектами ESG-финансирования / The “Main directions for the development of the financial market of the Russian Federation for 2024, 2025 and 2026” (developed by the Bank of Russia) predetermines the need and readiness of financial institutions to work on ESG-financing projects

Результаты и обсуждение

С целью проведения анализа развития ситуации ESG-банкинга в стране были рассмотрены результаты коммерческих банков по инициативам и проектам ESG, зафиксированные в публичных отчётах. Основные инициативы финансовых учреждений страны по соблюдению ESG-принципов включают в себя: внедрение системы ESG-оценки корпоративных кредитов; включение раздела по осуществлению ESG-деятельности в годовом отчёте банка; создание системы ESG-оценки собственных инвестиционных проектов и для клиентов банка; разработку обучающих документов в области ESG; формирование отчётов об экологичности банка, об устойчивом развитии; формирование стратегии ESG-цифровизации банка [8, 9].

Рассматривая реализацию ESG-повестки в деятельности банковского учреждения с позиции риск-ориентированного подхода, обозначенного в исследованиях авторов, опирающихся на обеспечение безопасного и устойчивого развития коммерческих структур [4], отметим следующие направления по управлению ESG-рисками на рисунке 1.

Так, основными направлениями, позволяющими обеспечить устойчивое развитие финансовой экосистемы в контексте ESG-

повестки, являются реализация мероприятий по интеграции ESG-рисков в уже функционирующую систему риск-менеджмента, а также эффективное управление специфическими рисками ESG, такими как социальные и управленческие, а также непосредственно связанные с экологической составляющей: риски в области климата и защиты окружающей среды. В свою очередь, каждое направление предполагает ряд решений, позволяющих минимизировать отмеченные риски.

Важным аспектом по управлению ESG-рисками является оценка эффективности реализации ESG-повестки, которая может быть выражена через конкретные показатели. Рассмотрим несколько расчётных показателей, которые помогут оценить успехи банка в реализации своих целей.

1. Расчёт экологического следа. Для оценки влияния банка на окружающую среду можно рассчитать совокупную сумму выбросов CO₂, связанных с его деятельностью. Сравнивая этот показатель с аналогичными данными за предыдущие годы, можно увидеть, удалось ли достичь снижения экологического следа.

2. Расчёт финансовых ресурсов, направленных на социальные программы. Один из показателей эффективности реализации социальной составляющей ESG-повестки может быть связан с объёмом финансовых ресурсов,



Рис. 1. Основные направления по управлению ESG-рисками в банковской сфере
 Fig. 1. Key areas for ESG risk management in the banking sector

выделенных банком на реализацию социальных программ. Проведя анализ этих данных, можно судить о приоритетах банка и его активной роли в социальной сфере.

3. Расчёт уровня участия сотрудников в ESG-инициативах. Оценка эффективности ESG-повестки также может быть связана с уровнем участия сотрудников в различных инициативах компании. Проведение опросов и мониторинга социальной активности сотрудников поможет определить, насколько успешно реализуется этот аспект ESG.

Все представленные показатели помогут более детально оценить реализацию ESG-повестки в деятельности коммерческих банков страны и определить, насколько успешно финансовая организация достигает своих целей в области устойчивого развития. Непрерывное изучение результатов и активное внедрение новых мероприятий позволят банкам укрепить свои позиции в области ESG и устойчивого бизнеса [10, 11].

Немаловажным компонентом развития экологических инициатив в рамках реализации ESG-принципов в банковской деятель-

ности является процесс их рейтингования и получения итоговой оценки зрелости практик устойчивого развития. Так, опираясь на результаты ежегодного аналитического обзора Национального рейтингового агентства от января 2025 г. [12], можно сделать следующие выводы относительно позиции экологической практики в работе финансовых институтов (рис. 2).

Итоговая оценка зрелости практик устойчивого развития в финансовом секторе проводилась путём оценивания ряда показателей по трём направлениям ESG и рассчитывалась как их среднее арифметическое. Наиболее высокий результат внедрения ESG соответствует оценке 1, а наиболее низкий – 0.

Для проведения оценки в качестве объектов исследования выступили 22 организации банковского сектора, 6 организаций страхового рынка, 3 организации лизингового рынка и 3 организации – профессиональные участники финансового рынка.

Согласно представленным на рисунке 2 данным можно сделать выводы о том, что внедрение экологических аспектов в рамках

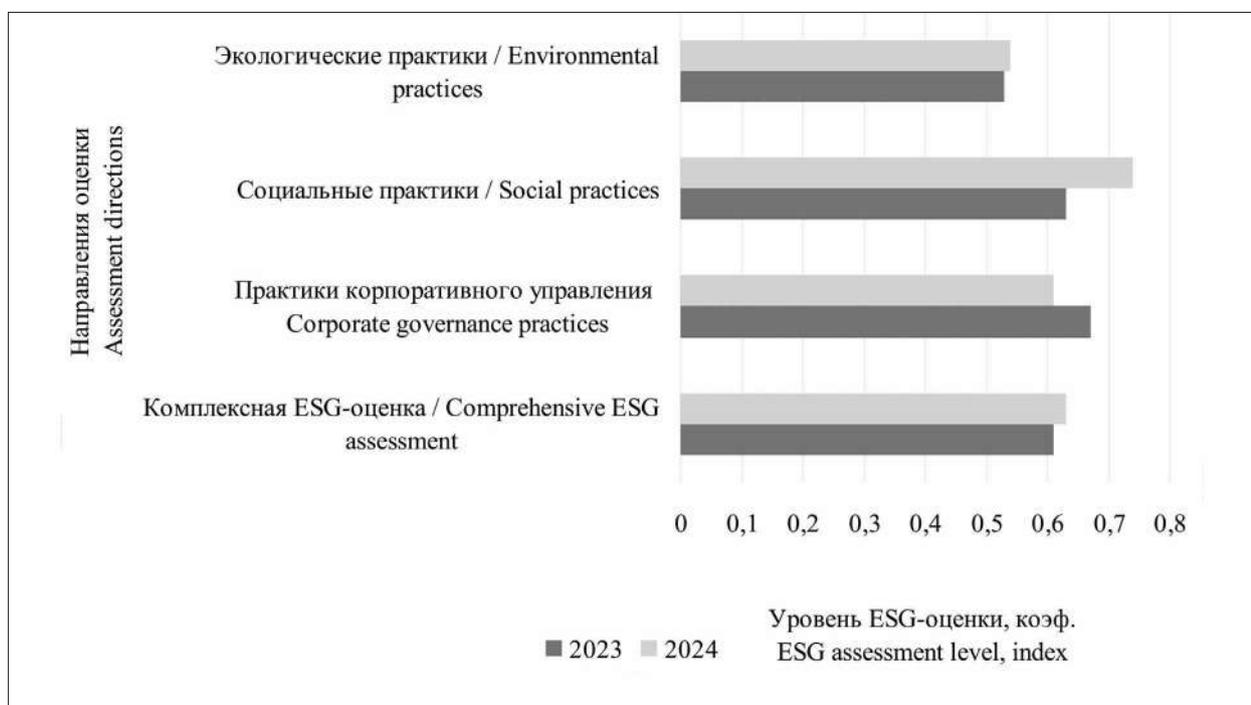


Рис. 2 Итоговая оценка зрелости практик устойчивого развития финансовых институтов
 Fig. 2. Final assessment of the maturity of financial institutions sustainable development practices

Таблица 2 / Table 2

Реализация экологических инициатив банками России
 Implementation of Russian banks environmental initiatives

Банк / Bank	Экологические инициативы / Environmental initiatives	Уровень раскрытия информации / Level of information disclosure
ПАО «Сбербанк» / Sberbank PJSC	Лидирующий банк страны по «зелёному» кредитованию; обладает собственной таксономией; значительное снижение собственного углеродного следа (2022–2024 гг.) / The country’s leading bank in “green” lending; the bank has its own taxonomy; significant reduction in its carbon footprint (2022–2024)	Очень высокий. Ежегодная публикация отчётов в области устойчивого развития / Very high. Annual reports on sustainability
ПАО «ВТБ» / VTB PJSC	Активное участие в выпуске «зелёных» облигаций; развитие «зелёной» ипотеки; финансирование проектов в сфере возобновляемой энергии / Active participation in “green” bonds issuance; development of green mortgages; financing renewable energy projects	Высокий. Наличие итогов ESG-повестки в интегрированном годовом отчёте / High. ESG agenda results in the integrated annual report
ПАО «Дом.РФ» / Dom.RF PJSC	Реализация проектов по запуску «зелёной» ипотеки; финансирование устойчивого развития городов; исполнение национальных проектов с учётом экологических принципов / Implementation of “green” mortgage projects; financing sustainable urban development; implementation of national projects taking into account environmental principles	Высокий. Раскрытие ESG-информации в годовом отчёте / High. ESG information in the annual report
АО «Альфа-Банк» / Alfa-Bank JSC	Развитие принципов ответственного финансирования; «зелёное» кредитование для бизнеса / Developing responsible finance principles; “green” lending for businesses	Среднее. Частичное раскрытие ESG-информации в годовом отчёте / Average. Partial ESG-information in the annual report

устойчивого развития является наиболее сложным из всех практик, хотя и наблюдается незначительный рост оценочного показателя на 2024 г. по сравнению с 2023 г. Ухудшение геополитической обстановки и усиление санкционного давления на финансовые учреждения привели к снижению уровня раскрытия информации о корпоративном управлении в этой сфере. На текущий момент банки получают значительно меньше выгоды от привлечения клиентов из экологически чистых отраслей по сравнению с практикой кредитования компаний из традиционных для России нефтегазовой и металлургической сфер. Кроме того, стоимость внедрения и поддержания таких практик является высокой.

Национальное рейтинговое агентство отмечает среди лидеров по внедрению экологической повестки ПАО «Сбербанк» (Сбер), ПАО «ВТБ» и ПАО «МКБ».

На основании ежегодных отчётов по устойчивому развитию, публикуемых банками [13], была составлена сводная таблица, отражающая основные результаты реализации экологических инициатив в рамках соблюдения ESG-принципов (табл. 2).

На основании данных таблицы 2 среди направлений, требующих дополнительной проработки, можно отметить расширение перечня экологически-ориентированных продуктов и услуг коммерческими банками с захватом розничного блока в том числе. В настоящее время подавляющее число банков предлагает возможность открытия «зелёного» депозита, но стоит обратить внимание на другие возможности, такие как «зелёные» кредиты или инвестиции в проекты, связанные с экологической устойчивостью. Увеличение числа таких предложений привлечёт больше клиентов, заинтересованных во вкладе в экологически ответственные проекты.

Ещё одним важным аспектом улучшения реализации ESG-повестки является прозрачность информации о социальных и экологических инициативах, не все банки своевременно и в полном объёме отражают результаты экологических инициатив. Среди рекомендаций можно отметить разработку специального раздела на своём веб-сайте, где будет представлена информация о проектах в области экологии и социальной ответственности, а также о достигнутых целях и планах на будущее. Такой раздел позволит клиентам и заинтересованным сторонам оценить работу банка в области ESG и принять информированное решение о сотрудничестве.

Также рекомендуется заинтересованным в реализации ESG-повестки финансовым структурам провести оценку текущих шкал ESG-рейтинга, используемых коммерческими банками, и, возможно, пересмотреть их, рейтинг должен быть основан на широком спектре показателей, включая информацию о воздействии финансовых продуктов на окружающую среду и социальную справедливость. При определении весовых коэффициентов для различных факторов следует учесть мнение заинтересованных сторон, включая клиентов, инвесторов и экспертов в области ESG [14, 15].

Заключение

Таким образом, устойчивое развитие всех хозяйствующих субъектов страны – одна из первостепенных целей на современном этапе развития мировой и отечественной экономики и политики. Большинство организаций на добровольно-принудительной основе придерживаются основных направлений ESG-стратегии, однако, показатели они вправе определять самостоятельно, что вызывает сомнения скептиков в адекватности последующей оценки.

Оценка результатов реализации ESG-принципов в деятельности финансовых компаний в России ведётся на основе множества разнообразных показателей, без единой стандартизации, что в настоящее время не позволяет выявить тенденции и провести полноценный статистический анализ.

В свою очередь, можно сформулировать основные сложности реализации ESG-стратегии в деятельности компаний, в том числе и коммерческих банков:

- не сформирована единая методика оценки результатов внедрения ESG-принципов, что не даёт возможности оценить адекватно результативность в сравнительной характеристике;

- набор показателей устойчивого развития пока не сбалансирован, присутствуют сложности в выборе адекватных управленческих решений;

- в показателях реализации ESG-повестки отсутствуют финансовые показатели деятельности (финансовая составляющая), что затрудняет оценку «устойчивого» потенциала организации, поскольку не позволяет оценить возможности финансового обеспечения экологического, социального и управленческого развития.

Следовательно, последующие направления реализации и оценки результативности

ESG-стратегии должны быть направлены на разработку стандартизированного набора показателей, а также оценку финансовой составляющей в процессе обеспечения реализации экологического, социального и управленческого направлений.

Литература

1. Караулов В.М., Караулова Л.В., Пугач В.Н., Каранина Е.В. Экологическая эффективность экономики как основа устойчивого развития региона // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 211–224. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-211-224

2. Домнина Е.А., Дабах Е.В., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я., Тимонов А.С. Мониторинг растительности в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 2. С. 63–71. doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-063-071

3. ESG-трансформация как вектор устойчивого развития / под ред. К.Е. Турбиной, И.Ю. Юргенса. Москва: Аспект Пресс, 2022. Т. 2. 650 с.

4. Донецкова О.Ю. Внедрение ESG-принципов в банковский бизнес // Управленческие науки. 2022. Т. 12. № 1. С. 42–55. doi: 10.26794/10.26794/2304-022X-2022-12-1-42-55

5. Довбий И.П., Кобылякова В.В., Кондратов М.В., Минкин А.А. ESG-переход: зелёная повестка в глобальной экономике и финансах // Управление в современных системах. 2022. № 1. С. 21–33. doi: 10.24412/2311-1313-33-21-33

6. Хайрутдинова А.И., Торопова И.В. ESG-банкинг в России // Весенние дни науки: сб. докладов междунар. конф. студентов и молодых ученых. Екатеринбург: УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2022. С. 1276–1283.

7. Алексеева Д.Г. Концепция правового регулирования ESG-банкинга [Электронный ресурс] <https://consortium.msal.ru/wp-content/uploads/2025/04/KONCEPCIYa-ESG-bankinga.pdf> (дата обращения: 12.04.2025).

8. Жукова Е.В. Основные тенденции развития ESG-повестки: обзор в России и в мире // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2021. Т. 18. № 6. С. 68–82. doi: 10.21686/2413-2829-2021-6-68-82

9. Мирошниченко М.А., Сивинцева К.К., Шопенская М.Д. Концепция устойчивого развития с применением принципа ESG на примере банковского сектора // Естественно-гуманитарные исследования. 2022. № 40. С. 186–197.

10. Замятина М.Ф., Тишков С.В. ESG-факторы в стратегиях компаний и регионов России и их роль в региональном инновационном развитии // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12. № 1. С. 501–518. doi: 10.18334/vines.12.1.114369

11. Касымова К.А., Сажина П.А., Широкова О.В. Опыт применения ESG-технологий в России // Современные вызовы экономики и систем управления в России в условиях многополярного мира: сб. статей и тезисов докладов III Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: ООО «Скифия-принт», 2022. С. 124–129.

12. Мельникова И., Гришунин С., Ковалёва В. Обзор стратегий и практик устойчивого развития российских финансовых институтов [Электронный ресурс] <https://www.ra-national.ru/wp-content/uploads/2023/04/strategii-i-praktiki-fin-inst.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).

13. Библиотеки корпоративных нефинансовых отчётов [Электронный ресурс] <https://rspp.ru/tables/non-financial-reports-library/> (дата обращения: 05.05.2024).

14. Марголин А.М., Вякина И.В. Риски, вызовы и механизмы ESG-трансформации систем управления // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2022. Т. 13. № 3. С. 352–368. doi: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.352-368

15. Макаров И.Н., Назаренко В.С., Осипова И.В., Лесных Е.В. ESG-подход в системе стратегического управления экономическими системами национального и регионального уровня // Креативная экономика. 2022. Т. 16. № 7. С. 2569–2586. doi: 10.18334/ce.16.7.114893

References

1. Karaulov V.M., Karaulova L.V., Pugach V.N., Karanina E.V. Eco-efficiency as the basis for sustainability development of the region // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 4. P. 211–224 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-211-224

2. Domnina E.A., Dabakh E.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Timonov A.S. Vegetation monitoring in the area of hazardous industrial waste disposal facilities // Theoretical and Applied Ecology. 2025. No. 2. P. 63–71 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-063-071

3. ESG transformation as a vector of sustainable development: in three volumes / Eds. K.E. Turbina, I.Yu. Yurgens. Moskva: Aspect Press Publ., 2022. V. 2. 650 p. (in Russian).

4. Donetskova O.Yu. Implementation of environmental, social and governance principles in banking business // Management sciences. 2022. V. 12. No. 1. P. 42–55 (in Russian). doi: 10.26794/10.26794/2304-022X-2022-12-1-42-55

5. Dovbij I.P., Kobylakova V.V., Kondratov M.V., Minkin A.A. ESG transition as a new paradigm of global economy and sustainable financing // Management in modern systems. 2022. No. 1. P. 21–33 (in Russian). doi: 10.24412/2311-1313-33-21-33

6. Khairutdinova A.I., Toropova I.V. ESG-banking in Russia // Spring Science Days: sbornik докладov mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh. Ekaterinburg: UrFU im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. Eltsina, 2022. P. 1276–1283 (in Russian).

7. Alekseeva D.G. Concept of ESG banking legal regulation [Internet resource] <https://consortium.msal.ru/wp-content/uploads/2025/04/KONCEPCIYa-ESG-bankinga.pdf> (Accessed: 12.04.2025).

8. Zhukova E.V. Key trends in ESG agenda development: reviewing the situation in Russia and the world // Vestnik of the Plekhanov Russian University of Economics. 2024. V. 18. No. 6. P. 68–82 (in Russian). doi: 10.21686/2413-2829-2024-6-68-82

9. Miroshnichenko M.A., Sivintseva K.K., Shopenskaya M.D. The concept of sustainable development using the ESG principle on the example of the banking sector // Natural-Humanitarian Studies. 2022. No. 40. P. 186–197 (in Russian).

10. Zamyatina M.F., Tishkov S.V. ESG factors in Russian business and regional strategies and their role in regional innovative development // Russian journal of innovation economics. 2022. V. 12. No. 1. P. 501–518 (in Russian) doi: 10.18334/vinec.12.1.114369

11. Kasymova K.A., Sazhina P.A., Shirokova O.V. Experience of application of ESG-technologies in Russia // Modern challenges in Russian economy and management

systems in a multipolar world: sbornik statey i tezisov dokladov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. St. Petersburg: Skifia-Print LLC, 2022. P. 124–129 (in Russian).

12. Melnikova I., Grishunin S., Kovaleva V. Review of sustainable development strategies and practices of Russian financial institutions [Internet resource] <https://www.ra-national.ru/wp-content/uploads/2023/04/strategii-i-praktiti-fin-inst.pdf> (Accessed: 05.05.2025).

13. Libraries of Corporate Non-Financial Reports [Internet resource] <https://rspp.ru/tables/non-financial-reports-library/> (Accessed: 05.05.2024).

14. Margolin A.M., Vyakina I.V. Risks, threats, and mechanisms of management systems ESG transformation // MIR (Modernization. Innovation. Research). 2022. V. 13. No. 3. P. 352–368 (in Russian). doi: 10.18184/2079-4665.2022.13.3.352-368

15. Makarov I.N., Nazarenko V.S., Osipova I.V., Lesnykh E.V. ESG approach in the strategic management of national and regional economic systems // Kreativnaya ekonomika. 2022. V. 16. No. 7. P. 2569–2586 (in Russian). doi: 10.18334/ce.16.7.114893

**О биологическом разнообразии растений
научно-образовательного центра «Ботанический сад»
Вятского государственного университета**

© 2026. Е. В. Лелекова, к. б. н.,
руководитель научно-образовательного центра
«Ботанический сад» ВятГУ,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: usr20893@vyatsu.ru

**About the biological diversity of plants
of the scientific and educational center “Botanical Garden”
of Vyatka State University**

© 2026. E. V. Lelekova ORCID: 0000-0002-6397-115X
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: usr20893@vyatsu.ru

Ботанический сад Вятского государственного университета – это научно-образовательный центр с более, чем столетней историей, современными технологиями и разработками. Его коллекционный фонд становится объектом исследований, экологического образования и развития естественно-научной функциональной грамотности посетителей.

Специфичные ландшафтные особенности территории площадью в 1,7 га, тематические участки, оранжерея – всё это создаёт условия для пополнения фонда редкими и охраняемыми растениями, представителями местной флоры, а также видами разных природных зон и экологических предпочтений. Коллекционный фонд ботанического сада представлен растениями открытого и закрытого грунтов. Он включает 208 семейств, 576 родов, 1009 видов, 6 подвидов, 20 разновидностей, 1108 сортов, 50 форм и 29 гибридов растений. Таксономический статус некоторых представителей находится на уточнении. Ежегодные численные коррективы в состав коллекционного фонда вносят погодные условия региона, которые сказываются на жизненном цикле интродуцентов.

Растения разных жизненных форм дополняют друг друга и произрастают на территории сада в составе тематических композиций. Среди древесно-кустарниковых форм многочисленны представители семейств Pinaceae

Lindl. и Cupressaceae Gray. Сосновые представлены 6 родами: *Picea* A. Dietr. (3 вида, 23 сорта, 1 форма), *Larix* Mill. (4 вида, 3 сорта), *Abies* Mill. (5 видов), *Tsuga* (Endl.) Carriere (1 вид), *Pseudotsuga* Carr. (1 вид, 2 разновидности), *Pinus* L. (7 видов, 2 разновидности, 1 подвид, 5 сортов). Семейство Кипарисовые включает роды: *Microbiota* Kom. (1 вид, 1 сорт), *Thujiopsis* (Thunb. ex L.f.) Siebold & Zucc. (1 вид, 2 сорта), *Juniperus* L. (4 вида, 1 форма, 18 сортов) и *Thuja* L. (1 вид, 27 сортов). Многочисленные таксоны многолетних травянистых растений органично вписываются в пространство, занятое деревьями и кустарниками. При этом преобладание сортов и гибридов, по сравнению с видами растений, обусловлено, в том числе, и демонстрационной функцией коллекционного фонда. Наиболее широко гибриды представлены в родах: *Astilbe* Buch.-Ham. ex, *Phlox* L., *Paeonia* L., *Tulipa* L., *Narcissus* L. и др.

Биологическое разнообразие ботанического сада пополняется растениями разных природных зон, которые постепенно акклиматизируются и успешно развиваются на его территории. Так, флору Северной Америки представляют *Aralia racemosa* L., *Silphium perfoliatum* L., *Sanguinaria canadensis* L. и др., Дальнего Востока – *Arisaema amurense* Maxim., *Dracocephalum argunense* Fisch. ex Link, *Trollius ledebourii* Rehb., *Artemisia stolonifera* (Maxim.) Kom. и др., Кавказ, Предкавказье,

Дагестан, Западное и Восточное Закавказье – *Centaurea dealbata* Willd., *Grossheimia macrocephala* (Muss.-Puschk. ex Willd.) Sosn. et Takht., *Doronicum orientale* Hoffm., *Hel-leborus caucasicus* A. Brown, *Adonis vernalis* L., *Campanula collina* Sims, *Iris graminea* L., *Pyrethrum balsamita* (L.) Willd. и др., Европу, Западную Сибирь и Среднюю Азию – *Paeonia tenuifolia* L., *Sanguisorba minor* Scop., *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newman, *Telekia speciosa* (Schreb.) Baumg., *Lychnis chalconica* L., *Petasites hybridus* (L.) G. Gaertn., В. Mey. & Scherb. и др. Жизненные формы растений **тропиков и субтропиков** представлены в оранжерее. Способы запасаения воды демонстрируют суккуленты *Euphorbia tirucalli* L., *Crassula arborescens* (Mill.) Willd., *Graptopetalum paraguayense* (N.E. Br.) E. Walther и др., воздушные корни – виды родов *Philodendron* Schott, *Monstera* Adans., приспособления к эпифитному образу жизни – *Tillandsia usneoides* (L.) L., *Platynerium bifurcatum* (Cav.) C. Chr. и другие виды растений.

Коллекция **плотоядных растений** (лиановидных кустарников и многолетних трав) представлена **5-ю семействами [1]: Droseraceae** Salisb., **Nepenthaceae** L., **Cephalotaceae** Dumort., **Sarraceniaceae** Dumort., **Lentibulariaceae** Rich. и 7-ю родами: *Dionaea* Sol. ex J. Ellis, *Drosera* L., *Nepenthes* L., *Cephalotus* Labill., *Sarracenia* L., *Darlingtonia* Hook. F., *Pinguicula* L. Семейство Droseraceae включает 6 видов: *Dionaea muscipula* J. Ellis, *Drosera capensis* L., *D. aliciae* Raym.-Hamet., *D. paradoxa* Lowrie., *D. binata* Labill., *D. rotundifolia* L. Семейство Nepenthaceae представлено 2-мя видами, 2-мя природными и **3-мя культивируемыми гибридами** (*Nepenthes sanguinea* Lindl., *Nepenthes* × *ventrata* Hort. ex Fleming, *Nepenthes* × [*ventricosa* × *ampullaria*] / *Nepenthes* × Blood Mary, *Nepenthes ampullaria* var. Green Jack., *Nepenthes* × *hookeriana* Hort. Veitch ex Mast., *Nepenthes* × [*fusca* × *maxima*] / *Nepenthes* × Gentle, *Nepenthes* × [*khasiana* × (*ventricosa* × *maxima*)] / *Nepenthes* × Gaya. Семейство Cephalotaceae в коллекции сада моновидовое и демонстрирует лишь *Cephalotus follicularis* Labill. Таксономическая категория Sarraceniaceae включает 2 вида, 1 подвид и 4 сортовые формы: *Sarracenia purpurea* subsp. *venosa* (Raf.) Wherry., *Sarracenia* cv. Tygo, *Sarracenia* cv. Fiona, *Sarracenia leucophylla* Raf., *Sarracenia* cv. Maroon, *Sarracenia purpurea* subsp. *venosa* cv. Dracula и *Darlingtonia californica* Torr. Семейство Lentibulariaceae знакомит посетителей с одним видом и двумя культивируемыми гибридами:

Pinguicula vulgaris L., *Pinguicula moranensis* var. *caudata* × spec. *Guatemala* и *Pinguicula* × *Weser Hort.* Slack.

Важнейшая задача ботанического сада – сохранение редких и охраняемых видов растений, а также организация просветительской деятельности, направленной на соблюдение мер охраны окружающей природной среды. Растения данной категории очень уязвимы, требуют специализированного ухода и воссоздания условий, близких к природным в их естественной среде обитания. Их видовой состав динамичен и варьирует как в сторону увеличения, так и уменьшения численности не только видов, но и их популяций. Мониторинг и постоянные фенологические наблюдения помогают подбирать условия произрастания и агротехники, а также апробировать их и находить оптимальные. По данным учёта 2023 г. [2], на территории ботанического сада произрастало 30 видов, включённых в Красную книгу Кировской области, 16 видов из списка Приложения 2 к Красной книге Кировской области и 24 вида из Красной книги РФ. Среди краснокнижных растений Кировской области три вида (*Adonis vernalis* L., *Delphinium cuneatum* Steven ex DC., *Helichrysum arenarium* (L.) Moench) имеют I категорию охраны (виды, находящиеся под угрозой исчезновения). Из растений, численность которых быстро сокращается (II категория), можно отметить *Stipapennata* L., *Lilium martagon* L., *Paeonia anomala* L. и др. Основная доля коллекции (73%) представлена редкими малочисленными видами (III категория): *Trifolium lupinaster* L., *Geranium sanguineum* L., *Laser trilobum* (L.) Borkh., *Campanula bononiensis* L., *Anemone sylvestris* L., *Thalictrum aquilegifolium* L., *Digitalis grandiflora* Mill., *Dactylorhiza maculata* (L.) Soo, *Carex flava* L., *Primula macracalyx* Bunge, *Prunus fruticosa* Pall., *Eupatorium cannabinum* L., *Tanacetum corymbosum* (L.) Sch. Bip. и др. **В соответствии с Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 23.05.2023 г. № 320 «Об утверждении Перечня объектов растительного мира, занесенных в Красную книгу РФ», актуализированы списки культивируемых редких и охраняемых растений, включённых в Красную книгу РФ. Среди них 22 представителя цветковых растений (*Crambe cordifolia* Steven, *Paeonia lactiflora* Pall., *Paeonia mlokosevitchii* Lomakin, *Sanguisorba magnifica* I. Schischk. et Kom., *Ampelopsis japonica* (Thunb.) Makino и др.) и два вида, при-**

надлежащие к Gymnospermae (*Microbiota decussata* Kom., *Taxus baccata* L.).

Культивирование растений, не характерных для конкретных природных зон, всегда несёт определённые риски. Всё ускоряющиеся темпы фитоинвазий ставят новые задачи перед ботаническими садами по признанию риска выращивания чужеродных видов растений, документирования и распространения информации обо всех случаях «бегства из культуры», соблюдения Кодекса поведения ботанических садов по инвазионным чужеродным видам. В настоящий момент на территории сада возможно наблюдать за развитием 56-ти инвазионных растений, большая часть из которых – выходцы из Европы и Азии [3]. Преимущественно это виды, которые активно внедряются в сообщества и объединены в 34 семейства цветковых растений. Среди них по числу чужеродных видов доминирующие позиции занимают Rosaceae Juss. (14,2%: *Cotoneaster lucidus* Schldl., *Crataegus monogyna* Jacq, *Malus baccata* (L.) Borkh., *Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun и др.) и Asteraceae Bercht. & J. Presl (10,7%: *Telekia speciosa* (Schreb.) Baumg., *Sonchus arvensis* L., *Petasites hybridus* (L.) G. Gaertn., B. Mey. & Scherb. и др.). Многолетних поликарпических трав на территории сада – 37,5% от общего числа инвазионных видов, доля кустарников составляет 26,7%, деревьев и монокарпических трав – по 14,3%, кустарничков и лиан – по 3,6%. Среди чужеродных видов на территории сада произрастают растения всех выделенных инвазионных статусов. Это, прежде всего, виды-трансформеры (1 статус), которые активно внедряются в естественные и природно-антропогенные сообщества. Они составляют 35,7% от общего количества видов. Среди них: *Amorpha fruticosa* L., *Parthenocissus quinquefolia* (L.) Planch., *Reynoutria sachalinensis* (F. Schmidt) Nakai и др. Чужеродные виды, активно расселяющиеся и натурализующиеся в нарушенных и естественных местообитаниях (2 статус: *Myosotis arvensis* (L.) Hill, *Symphytum asperum* Lepesch., *Vinca minor* L. и др.), и чужеродные виды, расселяющиеся и натурализовавшиеся в нарушенных местообитаниях, некоторые из них внедряющиеся в сообщества (3 статус: *Phedimus spurius* (M. Bieb.) 't Hart, *Symphoricarpos albus* (L.) S. F. Blake, *Viburnum lantana* L. и др.), составляют по 28,6%. Доля потенциально инвазионных видов (4 статус) относительно мала – 7,1% (*Campanula rapunculoides* L., *Glechoma hederacea* L., *Panicum capillare* L. и др.). Изучая

особенности структурной организации и способы распространения инвазионных видов, сотрудники научно-образовательного центра проводят просветительские мероприятия для посетителей по развитию их естественно-научной грамотности. На них обсуждаются меры, ограничивающие неконтролируемое разрастание растений в новых условиях, а также ответственность человека в нарушении природного равновесия в результате необдуманных действий. Ярким примером, иллюстрирующим агрессивное поведение инвазионных видов, служит система подземных побегов *R. sachalinensis* с почками возобновления разной продолжительности периода покоя на массивных подземных побегах. Необдуманное внедрение растения в ландшафтный дизайн приводит к резкому снижению биологического разнообразия в результате захвата территории и полного его освоения именно за счёт реализации их биологического потенциала. Наглядные и практические методы – самые результативные в работе с целевыми аудиториями и способствуют их экологическому просвещению.

Коллекционный фонд растений Ботанического сада Вятского государственного университета изучается с разных позиций. Так, выявление особенностей формирования структурной организации видов расширяет спектр мероприятий, направленных на создание благоприятных условий для их культивирования и выявления признаков угнетения в условиях интродукции. Кроме того, проводятся исследования, направленные не только на сохранение биологического разнообразия, но и на поиск объектов, перспективных для получения функциональных ингредиентов для лекарственной, пищевой и парфюмерно-косметической промышленности. Эколого-ценотические особенности, побегообразование и структурная организация *Sanguisorba officinalis* L., разработка технологий выращивания *Actinella oleracea* (L.) R. K. Jansen в условиях гидропоники и горшечной культуры, особенности побегообразования и компонентного состава вегетативных органов *Petasites hybridus* (L.) G. Gaertn., B. Mey. & Scherb., архитектура и фитохимический профиль разных сортов *Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim. и некоторых представителей *Ajuga* L.; биоморфологическое и фитохимическое исследование *Anemone canadense* (L.) A. Löve & D. Löve, структура подземных органов *Bergenia crassifolia* (L.) Fritsch и получение на их основе

функционального ингредиента, содержание основных компонентов эфирных масел некоторых сортов мяты перечной (*Mentha × piperita* L.) и др. – одни из перспективных направлений работ по изучению потенциала представителей флоры регионов России и мира и природосообразного его использования. Ежегодно эти работы проводят сотрудники Института биологии и биотехнологии ВятГУ, используя высокотехнологичное оборудование и возможности научной среды ботанического сада.

Таким образом, сохранение биологического разнообразия – одна из важнейших задач ботанических садов, независимо от их природоохранного статуса. Она успешно реализуется в научно-образовательном центре «Ботанический сад» Вятского государственного университета. Его коллекционный фонд при этом становится объектом научных исследований, природоохранной деятельности и играет важную роль в образовании и просвещении, направленных на развитие представлений о бережном отношении к природе.

Литература

1. Скоробогатая М.Н., Фурсова Е.А. Таксономическая характеристика насекомоядных растений в коллекции Ботанического сада Вятского государственного университета // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2023. Т. 22. № 2. С. 438–441. doi: 10.14258/pbssm.2023173

2. Коновалова И.А., Скоробогатая М.Н. Состав коллекции редких и охраняемых видов растений ботанического сада ВятГУ // Живые системы – 2023: Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием, посвящённой десятилетию восстановления экосистем (2020–2030). Саратов: Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, 2023. С. 140–142.

3. Скоробогатая М.Н., Коновалова И.А. Инвазивные растения ботанического сада Вятского государственного университета // Промышленная ботаника. 2024. Т. 24. № 1. С. 169–172.

References

1. Skorobogataya M.N., Fursova E.A. Taxonomic characteristics of carnivorous plants in the collection of the Botanical Garden of Vyatka State University // Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii. 2023. V. 22. No. 2. P. 438–441 (in Russian). doi: 10.14258/pbssm.2023173

2. Konovalova I.A., Skorobogataya M.N. The composition of the collection of rare and protected plant species of the VyatSU Botanical Garden // Living Systems – 2023: Sbornik nauchnykh statey II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy desyatiletuyu vosstanovleniya ekosistem (2020–2030). Saratov: Saratovskiy natsionalnyy issledovatel'skiy gosudarstvennyy universitet imeni N.G. Chernyshevskogo, 2023. P. 140–142 (in Russian).

3. Skorobogataya M.N., Konovalova I.A. Invasive plants of the botanical garden of Vyatka State University // Industrial Botany. Proceedings. 2024. V. 24. No. 1. P. 169–172 (in Russian).

Межпредметность как фактор повышения качества образования

© 2026. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
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: ecolab2@gmail.com

Interdisciplinarity as a factor in improving the quality of education

© 2026. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047
¹Vyatka State University,
 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of the Komi Science
 Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
 28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
 e-mail: ecolab2@gmail.com

30 января 2026 г. на базе Института развития образования Кировской области состоялась 53-я областная научно-практическая конференция учителей географии, биологии, химии, физики «Межпредметность как фактор повышения качества естественно-научного и географического образования». Безусловно, тематика конференции крайне актуальна, поскольку без обеспечения межпредметной связи в образовательном процессе, прежде всего, дисциплин естественного цикла, не достичь подготовки выпускника школы с широким спектром знаний в области промышленности, сельского хозяйства, экологии, медицины, социального благополучия и сохранения природного капитала. Подготовка выпускника школы с широким спектром знаний – требование жизни для развития нашей страны. Президент РФ В.В. Путин, Правительство РФ, Министерство образования РФ при подготовке как выпускников школ, лицеев, училищ и техникумов, так и вузов особое внимание обращают на широкомасштабное межпредметное образование. И это не случайно, так как стратегической целью Правительства РФ в области научно-технического развития в настоящее время является достижение технологической независимости по критически

важным направлениям биоиндустрии, глобального лидерства по ключевым направлениям развития биотехнологий, масштабная биологизация основных секторов экономики, формирование новых рынков и экспорт передовых биотехнологий.

Достичь этого невозможно без специалистов широкого профиля, мыслящих новыми междисциплинарными категориями, инженеров-интеграторов, способных управлять сложными биоэкономическими проектами; специалистов прикладного профиля – биоинженеров, биотехнологов, промышленных биоинформатиков, экономистов локальных систем и специалистов по развитию сообществ. Учитывая это, подготовка кадров должна обеспечиваться на стыке разных дисциплин: биотехнологий и искусственного интеллекта – для прогнозирования и моделирования сложнейших биологических процессов; управляемой эволюции – для ускоренного создания организмов с заданными свойствами; дизайна новых биомолекул – для конструирования принципиально новых материалов и лекарственных препаратов.

Перед высшими учебными заведениями при подготовке специалистов в данном направлении поставлена конкретная задача:

развитие профессиональных компетенций и навыков в области биотехнологий, биоэкономики, экологии и смежных дисциплин на основе внедрения современных междисциплинарных программ обучения. Развивать это направление подготовки кадров необходимо в тесной взаимосвязи с системой школьного и среднего профессионального образования.

В связи с этим конференция учителей химии, биологии, географии, физики проводилась с целью актуализации и распространения опыта работы педагогов по вопросам реализации интегративного подхода на уровне межпредметных связей в системе естественно-научного и географического образования.

В начале конференции состоялось открытие интерактивной выставки исследовательских работ обучающихся в организациях среднего профессионального и высшего образования Кировской области.

53 областную научно-практическую конференцию учителей географии, биологии, химии, физики открыла ректор КОГОАУ ДПО «Институт развития образования Кировской области», к. п. н. Н.В. Соколова, которая представила участников конференции, обратила внимание на актуальность обсуждаемой темы и пригласила всех присутствующих к участию в планируемых секционных мероприятиях. На открытии пленарного заседания конференции с приветствием выступили первый заместитель министра образования Кировской области О.В. Казаринова, от Общественной Палаты и Общественного Совета министерства образования – профессор Т.Я. Ашихмина. От ветеранов педагогического труда с тёплым приветствием выступила Г.А. Русских.

Докладом «Повышение качества естественно-научного образования как условие достижения технологического суверенитета страны» конференцию открыла С.В. Иванеско – ведущий эксперт отдела подготовки образовательного контента и проектирования программ дополнительного профессионального образования Института реализации государственной политики и профессионального развития работников образования ФГАОУ «Государственный университет просвещения» (г. Москва.)

Весьма глубоким по содержанию и конкретным по направлениям, методам и подходам был доклад заведующей кафедрой пред-

метных областей КОГОАУ ДПО «Института развития образования Кировской области» Н.В. Носовой «Межпредметность как ресурс повышения качества естественно-научного и географического образования». Особый аспект в области межпредметного взаимодействия был отражён в докладе ведущего методиста по биологии АНО ДПО «Национальный институт качества образования», к. б. н. А.Я. Соколовой «Межпредметная интеграция в условиях естественно-научной образовательной среды». С особым вниманием был заслушан доклад к. п. н., доцента ФГБОУ ВО «Кировский государственный медицинский университет» А.Н. Лямина, в котором на конкретных примерах обсуждался интегративно-гуманитарный подход в обучении школьников.

В завершении пленарного заседания ректор Н.В. Соколова поблагодарила докладчиков и, по традиции, сложившейся на предыдущих конференциях, вручила учителям, наиболее отличившимся в области образовательной деятельности, реализации инновационных программ, методов и подходов в обучении и воспитании школьников, дипломы, грамоты, почётные знаки.

Ярко, эмоционально, на высоком профессиональном уровне для всех участников конференции была проведена открытая лекция «Учитель – ученик: тонкая настройка» Ю.В. Бобринёвым – заместителем директора ГБОУ «Школа 1514», лауреатом премии в области образования г. Москвы 2021 г.

Работа конференции с участием учителей географии, биологии, химии, физики была продолжена на трёх секциях: «Межпредметность как фактор повышения качества урока», «Межпредметность как фактор повышения качества внеурочной деятельности», «Межпредметность как фактор повышения качества профильного обучения», на которых был представлен поистине творческий, инновационный опыт работы педагогов по вопросам реализации интегративного подхода на уровне межпредметных связей в системе естественно-научного и географического образования.

Безусловно, такие встречи, научные конференции, на которых участники обмениваются опытом, получают новые знания, новые практики, формируют свои компетенции для повышения качества образования, в том числе межпредметного, необходимы учителям.

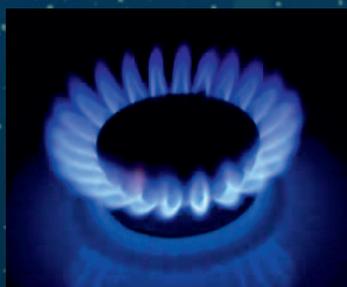
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ БИОГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ:

опыт кировской компании «СельхозБиоГаз» при выполнении задач нацпроекта «Технологическое обеспечение биоэкономики»

В основе технологии «СельхозБиоГаз» — замкнутый цикл производства.



Переработка органических отходов здесь даёт жизнь трём ключевым продуктам: *биогазу, биометану и органическим удобрениям*, которые находят применение в энергетике, на транспорте и в сельском хозяйстве.



«Серийное» производство биогazовых установок

Промышленность, сельское хозяйство, очистные сооружения, полигоны ТБО, энергетика и ЖКХ — биогazовые установки компании работают в самых разных сферах.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СУВЕРЕНИТЕТ НА ПРАКТИКЕ:

- Глубокая локализация: 90% отечественных материалов.
- Собственный инжиниринг: НИОКР, проектирование, производство.
- Результат: 14 биогazовых комплексов в 7 регионах, перерабатывающих 6 видов сырья.
- Научная база: сотрудничество с ведущими биотехнологическими НИИ и вузами России.



Новосибирская область
Мод. СБГ-20, каньига,
использование биогаза
на отопление, реализация
эффлюента в маркетплейсах



Кировская область
Мод. СБГ-5, навоз КРС,
использование биогаза на
отопление, эффлюент
круглогодично на поля



Амурская область
Мод. СБГ-50, навоз КРС,
биогаз на получение тепловой
и электрической энергии,
эффлюент круглогодично
вносится на поля

Директор ООО "СельхозБиоГаз" Фалевская Марина Анатольевна

Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004