



*Теоретическая
и прикладная*

2026

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 2

**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>



Кировская городская агломерация – исторический, культурный, промышленный и научный центр Приволжья

15 октября 2024 г. вступил в силу Закон Кировской области «О создании и развитии агломераций в Кировской области» № 310-ЗО. Основным стратегическим замыслом в развитии Городской агломерации является эффективное использование потенциала городского округа, а также учёт агломерационного развития города в качестве промышленного, научного, культурного, экономического центра, крупного транспортного узла. В категорию «Городская агломерация» включены: г. Киров как ядро агломерации (с населением 500457 человек); г. Кирово-Чепецк (64571 чел.) и г. Слободской (28479 чел.), Кирово-Чепецкий и Слободской муниципальные районы (51955 чел.). Площадь территории агломерации составляет 6789,3 км².

В населённых пунктах создаваемой Городской агломерации проживает более половины населения всей Кировской области. Вклад Агломерации в экономику региона составляют: машиностроение, химическое и металлургическое производство, производство готовых металлических изделий, деревообработка, лёгкая и пищевая промышленность, производство мебели, на которые приходится 75 % всего промышленного производства. Доля в областном показателе инвестиций в основной капитал составит 73,9 %, оборот малых и средних предприятий – 74,7 %, численность малого и среднего предпринимательства, включая микропредприятия – 72,4 %. На территории Агломерации широко развито сельское хозяйство и строительство.

Основными целями развития Агломерации являются: повышение эффективности экономики за счёт концентрации (уплотнения) экономической деятельности и развития агломерационных и межрегиональных экономических связей; обеспечение научно-технологического и инновационного развития, обеспечение транспортной и социальной инфраструктурой; создание условий для активного жилищного строительства; повышение надёжности

электроснабжения потребителей; улучшение качества жизни населения.

В рамках развития Агломерации уже начато строительство объекта «Транспортный переход под транссибирской магистралью в Нововятском районе г. Кирова». Запланировано строительство объездной автомобильной дороги Кирово-Чепецк – Слободской, создание Кампуса мирового уровня, проведение дноуглубительных работ на р. Вятке с целью развития судоходства.

Включение городов Кирова, Кирово-Чепецка и Слободского в официальный перечень городских агломераций России создаёт правовые и институциональные основания для перехода от точечного развития отдельных муниципалитетов к системному пространственному развитию. Реализация задачи требует координации градостроительной, транспортной, инженерной и социальной политики трёх городов, а также синхронизации с задачами по интенсификации территории, категорированию жилой застройки, развитию инженерной инфраструктуры и формированию рекреационного каркаса. Только при таком комплексном подходе агломерация становится инструментом повышения качества жизни граждан.

О.Г. Созинов, заместитель главы администрации г. Кирова





Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 2, 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 (№ 2732 по состоянию на 29.04.2026).

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, Белый список 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@vnyatsu.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: 25.06.2026.

Тираж 250 экз. Заказ № 0245. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская цифровая типография»

Адрес типографии: 610046, Кировская область,
г. Киров, ул. Труда, 84а

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

- А.М. Асхабов** д.г.-м.н., академик РАН, профессор,
научный руководитель ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Т.К. Головкин** д.б.н., профессор, главный научный сотрудник
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- 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 государст-
венного 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 государ-
ственного 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

12+



*Theoretical
and Applied
ECOLOGY*
No. 2, 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, White List 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".

Release date: June 25, 2026.

Circulation 250 copies. Order No. 0245. 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. Kolomiyets** Doctor in Biology, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State University
- 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

- Ю. А. Березина, О. Ю. Беспятых, А. С. Сюткина, И. А. Домский, В. В. Ширяев* Влияние факторов окружающей среды на параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae) (обзор) 6
- А. Н. Чусов, П. С. Шинкевич, Н. А. Политаева, К. А. Вельможина, А. М. Опарина, Н. В. Зибарев* Использование биомассы микроводорослей для улавливания CO₂ из дымовых газов и получения биодизеля (обзор) 16
- А. М. Кузьмин* Переработка попутного нефтяного газа в метанол: экологические последствия факельного сжигания и перспективы низкоуглеродной энергетики (обзор) 29

СТАТЬИ

- А. В. Стрелецкий, Д. Б. Каменецакая, О. Н. Савостикова* Исследование состава водных проб окружающей среды на содержание анионных поверхностно-активных веществ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии 40
- А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина* Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование 48
- Е. А. Домнина, С. В. Шабалкина, О. Н. Пересторонина, А. С. Тимонов* Научно-практические подходы к функциональному зонированию государственного природного заказника «Пижемский» (Кировская область) 58
- А. С. Петрова, А. С. Саидова, Е. В. Шмыкова, И. Д. Ардзинба* Финансовые аспекты и доходы бюджетов в природоохранную деятельность РФ за период 2015–2024 гг. 67
- Л. Х. Шугушева, М. С. Гудова, М. М. Емкужева* Мониторинг сообществ мелких млекопитающих в естественных и нарушенных условиях предгорий Центрального Кавказа 83
- М. В. Уманская, Е. С. Краснова* Характеристика бактериопланктона Камских водохранилищ в летний период 2022 года 92
- М. Х. Хето, Т. Я. Ашихмина, Н. В. Сырчина* Состояние, перспективы развития системы контроля и мониторинга атмосферного воздуха в регионе 100
- Л. И. Домрачева, Т. Я. Ашихмина, Е. А. Домнина, А. И. Коротких, Л. В. Трефилова, А. Л. Ковина, А. С. Тимонов* Состояние лишайниково-сосновой эпифитной микробиоты в районе бывшего объекта уничтожения химического оружия ... 117
- В. В. Старцев, А. А. Дымов* Амфифильные свойства почвенного органического вещества в первые годы после рубки древостоя 129
- А. А. Калинина, Т. Н. Соколова, П. С. Афанасьева, А. О. Кувшинова, Т. М. Балужева, А. Д. Тубакина* Ингибирующий эффект иодиноформазана в восстановлении иоднитротетразолия хлорида суспензией бактерии *Bacillus stearothermophilus* в физиологическом растворе 137
- Р. Я. Исхакова, Л. А. Николаева* Исследование механизма адсорбционной очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ модифицированным отходом энергетики для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду 145
- А. А. Утомбаева, А. А. Вершинин, Э. Р. Зайнулгабидинов, А. М. Петров* Респираторная активность и деструкция нефтепродуктов в почвах, содержащих гранулированный осадок сточных вод 156

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

**ЭКОТОКСИ-
КОЛОГИЯ**

- E. N. Skuratovskaya, S. V. Alyomov, T. B. Sigacheva, A. V. Serbina* Bioaccumulation and biochemical effects of diesel on Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 165
T. С. Дроганова, А. А. Лазарева, Л. В. Поликарпова, Д. А. Арешидзе, Н. В. Васильев Влияние токсикантов анионного типа на состояние тканей гепатопанкреаса живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) 174

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

- И. Г. Широких, Н. А. Боков, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина* Профили антибиотикорезистентности стрептомицетов из разных почв Вятского Прикамья 183
Л. В. Кондакова, Т. Я. Ашихмина, Л. И. Домрачева Реакция водорослей и цианобактерий лесных и луговых экосистем на техногенное воздействие 192
М. А. Шелякин, Е. В. Гармаш, Е. В. Силина, К. В. Ядрихинский, Э. Е. Ротэрмель, Л. А. Иванчина Состояние фотосинтетического аппарата и уровень окислительного стресса хвои *Abies sibirica* L. на разных стадиях усыхания деревьев, поражённых уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandford) в лесных насаждениях Пермского края 200
Н. А. Воронин, В. А. Сомин Изучение сорбции ионов кобальта из воды раковинной моллюска *Lissachatina fulica* 210

**ЭКОЛОГИЯ
И КЛИМАТ**

- С. В. Загирова, М. Н. Мигловец, Р. Г. Гуляев* Влияние погодных условий вегетационного периода на фотосинтез и эвапотранспирацию в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаёжной подзоны 219

ИНФОРМАЦИЯ

- Т. А. Мусихина* Классификация отходов как основа управления потоками отходов. Нормативно-правовой аспект 229
Т. Я. Ашихмина, М. Л. Сазанова «Экология родного края: проблемы и пути их решения»: итоги работы III Международной научно-практической конференции 240

**THEORETICAL
PROBLEMS
OF ECOLOGY**

- Yu. A. Berezina, O. Yu. Bespyatykh, A. S. Syutkina, I. A. Domskey, V. V. Shiryayev* Environmental effect on Canidae's red blood parameters: a review 6
A. N. Chusov, P. S. Shinkevich, N. A. Politaeva, K. A. Velmozhina, A. M. Oparina, N. V. Zibarev Using microalgae biomass to capture CO₂ from flue gases and produce biodiesel: a review 16
A. M. Kuzmin Associated petroleum gas processing into methanol: environmental impacts of flaring and prospects for low carbon energy: a review 29

**METHODOLOGY
AND RESEARCH
METHODS.
MODELS AND
FORECASTS**

- A. V. Streletskiy, D. B. Kamenetskaya, O. N. Savostikova* Study on environmental water samples for anionic surfactants by high-performance liquid chromatography 40
A. V. Kuznetsov, D. N. Vtyurina Broadband acoustic impact on the adhesion of marine fouling organisms from Sevastopol Bay: experimental study and modeling 48
E. A. Domnina, S. V. Shabalkina, O. N. Perestoronina, A. S. Timonov Scientific and practical approaches to functional zoning of the Pizhemskiy State Nature Reserve (Kirov Oblast) 58
A. S. Petrova, A. S. Saidova, E. V. Shmykova, I. D. Ardzinba Financial aspects and budget revenues for environmental protection activities in the Russian Federation for 2015–2024 67

CONTENTS

REVIEWS

ARTICLES

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

L. H. Shugusheva, M. S. Gudova, M. M. Emkuzheva Monitoring of small mammals' communities in natural and disturbed biotopes in the Central Caucasus foothills 83

M. V. Umanskaya, E. S. Krasnova Heterotrophic bacterioplankton in the Kama reservoirs in summer 2022 92

M. H. Kheto, T. Ya. Ashikhmina, N. V. Syrchina Status and prospects for the development of regional air control and monitoring systems 100

L. I. Domracheva, T. Ya. Ashikhmina, E. A. Domnina, A. I. Korotkikh, L. V. Trefilova, A. L. Kovina, A. S. Timonov The state of the lichen-pine epiphytic microbiota in the area of a former chemical weapons destruction facility 117

**CHEMISTRY
OF NATURAL
ENVIRONMENTS
AND OBJECTS**

V. V. Startsev, A. A. Dymov Amphiphilic properties of soil organic matter in the first years after stand cutting 129

A. A. Kalinina, T. N. Sokolova, P. S. Afanasieva, A. O. Kuvshinova, T. M. Balueva, A. D. Tubakina Iodmonoformazan inhibits iodinitrotetrazolium chloride reduction by *Bacillus stearothermophilus* suspension in a saline solution 137

**ECOLOGIZATION
OF PRODUCTION**

R. Ya. Iskhakova, L. A. Nikolaeva Study of the mechanism of adsorption wastewater treatment from surfactants by modified energy waste to reduce anthropogenic impact on the environment 145

**REMEDIAION
AND RECULTIVATION**

A. A. Utombaeva, A. A. Vershinin, E. R. Zainulgabidinov, A. M. Petrov Soil respiratory activity and oil products degradation when adding granulated sewage sludge 156

ECOTOXICOLOGY

E. N. Skuratovskaya, S. V. Alyomov, T. B. Sigacheva, A. V. Serbina Bioaccumulation and biochemical effects of diesel on Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 ... 165

T. S. Drozanova, A. A. Lazareva, L. V. Polikarpova, D. A. Areshidze, N. V. Vasiliev Anionic toxicants' effect on *Viviparus viviparus* L. hepatopancreas tissues 174

**POPULATION
ECOLOGY**

I. G. Shirokikh, N. A. Bokov, A. A. Shirokikh, T. Ya. Ashikhmina Antibiotic resistance profiles of streptomycetes from different soils of the Vyatka Prikamye 183

L. V. Kondakova, T. Ya. Ashikhmina, L. I. Domracheva, K. A. Bezdenzhnykh, I. A. Kondakova Response of algae and cyanobacteria in forest and meadow ecosystems to man-made impacts 192

M. A. Shelyakin, E. V. Garmash, E. V. Silina, K. V. Yadrikhinsky, E. E. Rotermel, L. A. Ivanchina Photosynthetic apparatus state and oxidative stress level in needles of *Abies sibirica* L. at different stages of tree dieback infested with the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in forest stands of the Perm Krai 200

N. A. Voronin, V. A. Somin Study of cobalt ions' sorption from water by *Lissachatina fulica* shell 210

**ECOLOGY AND
CLIMATE CHANGE**

S. V. Zagirova, M. N. Miglovets, R. G. Guluaev Weather during the growing season affect photosynthesis and evapotranspiration in the cowberry-lichen pine forest of the middle taiga subzone 219

INFORMATION

T. A. Musikhina Waste classification as the basis for waste flow management. Regulatory and legal aspects 229

T. Ya. Ashikhmina, M. L. Sazanova "Home country ecology: problems and solutions": III International scientific and practical conference outcomes 240

Влияние факторов окружающей среды на параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae) (обзор)

© 2026. Ю. А. Березина¹, к. вет. н., с. н. с.,
 О. Ю. Беспятых^{1,2}, д. б. н., в. н. с., зав. кафедрой,
 А. С. Сюткина¹, к. вет. н., с. н. с.,
 И. А. Домский¹, член-корреспондент РАН, научный руководитель института,
 В. В. Ширяев¹, д. б. н., в. н. с.,

¹Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова, 610000, Россия, г. Киров, ул. Преображенская, д. 79,

²Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
 e-mail: uliya180775@bk.ru

Обзор посвящён влиянию различных факторов окружающей среды на параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae). В качестве модельных видов рассмотрены енотовидная и домашняя собака, лисица, песец и гривистый волк. Экологические условия могут существенно влиять на состав крови, обуславливая физиологические реакции организма. Значительную роль в адаптации животных к окружающей среде выполняют сезонные изменения параметров красной крови. В зимний период, по сравнению с летним, происходит увеличение уровня гематокрита, гемоглобина и количества эритроцитов у животных, что обусловлено уменьшением общего объёма крови у животных в холодное время года, когда потребление воды ограничено. У диких животных большинство параметров красной крови выше, чем у одомашненных. К уменьшению содержания эритроцитов и гемоглобина приводит заражение животных паразитами. Степень изменений параметров красной крови зависит от типа паразита и тяжести заболевания. Загрязнение окружающей среды выхлопными газами автомобилей приводит к снижению содержания эритроцитов, гемоглобина и гематокрита. Длительное воздействие этих веществ может привести к анемии, нарушению функции тромбоцитов и другим серьёзным заболеваниям. Радиоактивное излучение также способствует развитию анемии, причём это происходит уже через 2 недели после воздействия радиоактивного загрязнения. Пограничные зоны и агроландшафты характеризуются высокой экологической нагрузкой, включая паразитарное давление и контакты с домашними животными, что может вызывать физиологические сдвиги в организме. Способность организма животных к адаптации и сохранению гомеостаза играет ключевую роль в поддержании их здоровья в условиях изменяющейся окружающей среды. Показано, что параметры красной крови животных семейства Псовые являются надёжными индикаторами в методах диагностики, лечения и прогнозирования заболеваний животных. Их изменения свидетельствуют о развитии патофизиологических реакций. Параметры красной крови животных семейства Псовые изменяются под воздействием условий окружающей среды, поэтому ПКК можно использовать в качестве индикаторов для оценки физиологического статуса животных и оценки изменений окружающей среды.

Ключевые слова: окружающая среда, адаптация организма, параметры красной крови, Псовые.

Environmental effect on Canidae's red blood parameters: a review

© 2026. Yu. A. Berezina¹ ORCID: 0000-0001-5082-716X¹

O. Yu. Bespyatykh^{1,2} ORCID: 0000-0002-4539-7385²

A. S. Syutkina¹ ORCID: 0000-0003-3234-8602¹

I. A. Domskey¹ ORCID: 0000-0003-1633-1341¹

V. V. Shiryayev¹ ORCID: 0000-0002-4549-5727²

¹Research Institute of Game Management and Fur Farming (VNIIOZ) named after prof. B.M. Zhitkov, 79, Preobrazhenskaya St., Kirov, Russia, 610000

²Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
 e-mail: uliya180775@bk.ru

The review is devoted to the environmental effect on the red blood parameters (RBPs) of canine animals. Environmental conditions can significantly affect the blood composition, causing the physiological reactions of the body. Seasonal changes in RBPs play a significant role in the adaptation of animals to the environment. In winter, compared with summer, there is an increase in the level of hematocrit, hemoglobin and the number of red blood cells in animals, due to a decrease in the total blood volume in animals during the cold season, when water consumption is limited. Most of the RBPs are higher in wild animals than those of domesticated animals. Infection of animals with parasites decreases the content of red blood cells and hemoglobin. The degree of changes in RBPs depends on the type of parasite and the severity of the disease. Environmental pollution with car exhaust fumes leads to a decrease in the content of red blood cells, hemoglobin and hematocrit. Prolonged exposure to these substances can lead to anemia, platelet dysfunction, and other serious diseases. Radiation also contributes to anemia, and this occurs as early as 2 weeks after radioactive exposure. Border zones and agricultural landscapes are characterized by high environmental stress, including parasitic pressure and contact with pets, which can cause physiological changes in the body. The ability of animals to adapt and maintain homeostasis plays a key role in maintaining their health in a changing environment. It is shown that the RBPs in canine animals are reliable indicators in the methods of diagnosis, treatment and prediction of animal diseases. RBPs' changes indicate pathophysiological reactions. Canidae RBPs change under the environmental effect, so RBPs can be used as indicators to assess the environmental changes and physiological status of animals.

Keywords: environment, body adaptation, red blood parameters, Canidae.

В настоящее время особое внимание уделяется проблеме загрязнения окружающей среды и его воздействию на живые организмы. Промышленные выбросы, содержащие токсичные вещества, оседают в почве, воде и атмосфере, попадая в организм животных через вдыхаемый воздух, пищу и кожные покровы [1–5]. Эти загрязняющие вещества, попадая в кровь, изменяют её состав, что приводит к различным нарушениям и заболеваниям. Гематологические исследования становятся незаменимым инструментом для оценки этих изменений и мониторинга состояния животных, подвергшихся воздействию неблагоприятных факторов [6–8].

Современные исследования подтверждают, что гематологические показатели являются важными маркерами адапционных реакций организма на факторы внешней среды, такие как загрязнение воздуха, воды и почвы, а также воздействие токсичных химических веществ, используемых в промышленности и сельском хозяйстве [9–13]. Эти факторы оказывают существенное влияние на здоровье животных, изменяя состав их крови и вызывая разнообразные патологии [14]. Изучение этих изменений позволяет не только оценивать состояние животных, но и выявлять влияние экологических стрессоров на организм [15–18].

Кровь, являясь внутренней лабильной средой организма, отражает степень адапционных реакций к изменяющимся внешним условиям, а также служит индикатором состояния здоровья организма [19]. Её морфологические и биохимические показатели чутко реагируют на колебания факторов окружающей среды (ОС), что позволяет считать гематологические исследования важным инструментом понимания процессов адаптации [6, 20].

Параметры красной крови, такие как количество эритроцитов, содержание гемоглобина, гематокрит, являются важнейшими индикаторами здоровья животных. В нормальных условиях эти показатели крови находятся в физиологических пределах, что отражает нормальное функционирование организма [19, 21]. Однако под воздействием неблагоприятных факторов ОС происходят изменения в составе крови, что может указывать на патологические процессы. Нарушение баланса химических компонентов крови является основным принципом диагностики множества заболеваний [22–27].

Эритроциты, или красные кровяные клетки, выполняют функцию переноса кислорода к тканям [28–31]. Уровень эритроцитов непосредственно связан с транспортировкой кислорода и углекислого газа в организме животных. Следовательно, снижение количества эритроцитов приводит к снижению поступления кислорода в ткани и уровня углекислого газа, выделяемого из организма [32, 33].

Гемоглобин является металлопротеином, который переносит кислород в эритроцитах всех позвоночных [34, 35]. Он играет важную роль в транспортировке кислорода к тканям животного для окисления съеденной пищи и освобождения энергии для других функций организма. Гемоглобин также выводит углекислый газ из организма животных [32].

Объём эритроцитов, известный также как гематокрит или объёмная доля эритроцитов, указывает на процентное содержание эритроцитов в крови [20]. Высокий уровень гематокрита указывает на увеличение количества эритроцитов или снижение объёма плазмы в крови [36].

Ранее отмечалось, что объём эритроцитарной массы, гемоглобин и средний корпускулярный гемоглобин являются важными показателями для оценки эритроцитов и способности костного мозга производить их [37]. Установлено, что низкий уровень среднего корпускулярного гемоглобина и средней концентрации корпускулярного гемоглобина свидетельствует о наличии анемии [38].

Изучение приспособлений животных к условиям ОС является важной задачей современной науки. Изучение физиологических ресурсов, необходимых для нейтрализации вредных воздействий, позволяет оценить, достаточно ли у организма животных механизмов адаптации или требуется формирование новых защитных механизмов [24]. Таким образом, гематологические исследования играют важную роль не только в диагностике заболеваний, но и в оценке адаптивных возможностей организмов, подвергающихся воздействию различных экологических факторов [39].

Цель данной работы заключается в анализе мирового опыта исследования влияния различных факторов окружающей среды на параметры красной крови у животных семейства Псовые (Canidae) и оценке их адаптивных возможностей в условиях экологического стресса.

Объекты и методы исследования

Поиск информации по влиянию факторов окружающей среды на параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae) проводили в базах данных Scopus (<http://www.scopus.com>), Академия Google (<https://scholar.google.ru>), PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU (<http://www.elibrary.ru>). Для отбора публикаций применяли ключевые слова: окружающая среда, адаптация организма, параметры красной крови, животные семейства Псовые, а также ключевые слова из научных публикаций близкой тематики. Ключевые слова использовались в различных комбинациях в соответствии с правилами соответствующей базы данных. В обзоре обсуждаются и анализируются публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей из наиболее рейтинговых журналов и с высоким индексом цитирования. Основная часть проанализированных работ была опубликована в последние 20 лет. Анализ собранных данных представлен в соответствующих разделах обзора.

Нормальные значения показателей красной крови у самцов и самок

Нормальные значения параметров красной крови различных видов животных играют важную роль в оценке их физиологического состояния, питания и общего здоровья. Эти параметры позволяют не только оценивать текущее состояние организма, но и сравнивать его с аналогичными данными других видов, что особенно важно в ветеринарной практике и исследованиях по экологии животных [21, 40, 42]. Например, выявлено [43], что у енотовидных собак (*Nyctereutes procyonoides* Gray, 1834) и лисиц (*Vulpes vulpes* Linnaeus, 1758) наблюдаются сходные значения эритроцитов (RBC) и гемоглобина (Hb), что может свидетельствовать об их схожем уровне физиологической адаптации к условиям среды. Так, количество эритроцитов было зафиксировано у енотовидных собак на уровне $(7,5-7,7) \cdot 10^{12}/л$ и у лисиц – $(8,6-8,9) \cdot 10^{12}/л$. В свою очередь, уровень гемоглобина составил 140,2–140,8 и 139,7–140,3 г/л, соответственно. Достоверных различий между показателями самцов и самок в представленных исследованиях не выявлено (табл.).

Подтверждены вышеуказанные тенденции и для енотовидных собак, у которых диапазоны гематологических показателей взрослых особей: эритроциты – $7,80-8,14 \cdot 10^{12}/л$, гемоглобин – 162–171 г/л (табл.) [44]. С вышеприведёнными сведениями согласуются исследования [45], которые представили результаты для серебристо-чёрных лисиц, указав среднее значение RBC $9,3 \cdot 10^{12}/л$. Гемоглобин у этих животных достигал 160 г/л, что является показателем хорошего уровня кислородного обмена в организме.

Подобные результаты наблюдались и у самок песца (*Vulpes lagopus* Linnaeus, 1758). Согласно исследованию [46], эритроциты в крови песца варьировали в пределах от 8,56 до $9,18 \cdot 10^{12}/л$, а уровень гемоглобина – от 153 до 165 г/л, что подчёркивает возрастные колебания этих показателей (табл.). Эти различия могут быть обусловлены не только физиологическими особенностями вида, но и условиями содержания, возрастом и внешними факторами, такими как сезонные изменения.

Влияние сезона года на параметры красной крови

Сезонные изменения физиологических параметров также играют значительную роль

Таблица / Table

Параметры красной крови у животных семейства Псовые (Canidae) / Red blood parameters in Canidae

| Вид животного Species | Влияющий фактор Affecting factor | Нормальные значения, пол животных / Physiological standard, sex | | | Гематокрит (НСТ), % Hematocrit (HCT), % | Источник Reference |
|---|---|---|--|--|--|-----------------------|
| | | Эритроциты (RBC), · 10 ¹² /л Red blood cells (RBC), · 10 ¹² /L | Гемоглобин (Hb), г/л Hemoglobin (Hb), g/L | Гемоглобин (Hb), г/л Hemoglobin (Hb), g/L | | |
| <i>Nyctereutes procyonoides</i> | самец / male | 7,71 ± 0,97 | 142,8 ± 21,2 | | 47,0 ± 6,0 | [43] |
| | самка / female | 7,51 ± 1,00 | 140,2 ± 19,7 | | 46,0 ± 7,0 | |
| | самец / male | 8,14 ± 0,49 | 170,6 ± 9,34 | | 56,3 ± 4,1 | [44] |
| | самка / female | 7,80 ± 0,19 | 162,0 ± 1,9 | | 53,4 ± 1,0 | |
| | самец / male | 8,60 ± 0,68 | 140,3 ± 11,0 | | 47,0 ± 4,0 | [43] |
| | самка / female | 8,94 ± 0,82 | 139,7 ± 14,5 | | 48,0 ± 5,0 | |
| <i>Vulpes lagopus</i> | самка / female | 9,3 | 160 | | – | [45] |
| | самка / female | 8,56 ± 0,24 | 154,0 ± 5,3 | | 48,0 ± 2,0 | [46] |
| Сезон года / Season | | | | | | |
| <i>Nyctereutes procyonoides</i> | весна / spring | – | 103 | | 31,6 | [47] |
| | осень / autumn | – | 120 | | 36,4 | |
| Способ разведения / Breeding method | | | | | | |
| <i>Nyctereutes procyonoides</i> | клеточное разведение breeding on the farm | 7,09 ± 0,41 | 131,2 ± 9,2 | | 0,41 ± 0,02 | [49] |
| | дикая / wild | 7,14 ± 0,96 | 132,0 ± 21,7 | | 0,39 ± 0,06 | |
| | клеточное разведение breeding on the farm | 7,09 ± 0,41 | 101,2 ± 4,6 | | 0,50 ± 0,03 | |
| <i>Vulpes vulpes</i> | дикая / wild | 7,14 ± 0,96 | 81,1 ± 21,7 | | 0,34 ± 0,14 | |
| Паразитарная инвазия / Parasitic invasion | | | | | | |
| <i>Canis lupus familiaris</i> | здоровые / healthy | 7,06 ± 0,21 ^{abc} | 105,4 ± 0,23 ^{abc} | | 46,55 ± 2,82 ^{abc} | [52] |
| | инвазированные <i>B. canis</i> invaded <i>B. canis</i> | 5,05 ± 0,15 ^a | 74,9 ± 0,21 ^a | | 22,48 ± 1,94 ^a | |
| | инвазированные <i>D. repens</i> infested <i>D. repens</i> | 6,16 ± 0,38 ^b | 81,8 ± 0,54 ^b | | 37,65 ± 5,09 ^b | |
| | коинфекции <i>B. canis</i> и <i>D. repens</i> / <i>B. canis</i> and <i>D. repens</i> coinfections | 5,77 ± 0,50 ^c | 86,1 ± 0,71 ^c | | 36,14 ± 6,66 ^c | |

| Вид животного Species | Влияющий фактор Affecting factor | Эритроциты (RBC), · 10 ¹² /л Red blood cells (RBC), · 10 ¹² /L | Гемоглобин (Hb), г/л Hemoglobin (Hb), g/L | Гематокрит (HCT), % Hematocrit (HCT), % | Источник Reference |
|-------------------------------------|---|---|--|--|-----------------------|
| <i>Canis lupus familiaris</i> | низкий уровень загрязнения / low level of pollution | 6,83 ± 0,19 ^a | 165,2 ± 7,8 ^a | 47,20 ± 1,69 ^a | [55] |
| | средний уровень загрязнения / average level of pollution | 6,21 ± 0,18 ^b | 139,5 ± 17,6 ^b | 42,26 ± 1,56 ^b | |
| | высокий уровень загрязнения / high level of pollution | 6,56 ± 0,48 ^{ab} | 162,1 ± 11,5 ^{ab} | 47,70 ± 2,92 ^{ab} | |
| Радиоактивное излучение / Radiation | | | | | |
| <i>Canis lupus familiaris</i> | здоровые / healthy | 6,1 ± 0,07 ^a | 91,25 ± 1,40 ^a | – | [57] |
| | больные (на 14 день после загрязнения) / sick (on the 14th day after contamination) | 3,3 ± 0,01 ^a | 62,88 ± 2,48 ^a | – | |
| Места обитания / Habitats | | | | | |
| <i>Chrysocyon brachyurus</i> | внутри национального парка / inside the National Park | 4,7 ± 0,1 | 120,2 ± 3,0 | 38,0 ± 1,0 | [58] |
| | у границы национального парка / near the border of the National Park | 5,0 ± 0,2 | 130,6 ± 4,0 | 40,6 ± 1,0 | |
| | прилегающие к парку сельхозугодья / lands adjacent to the National Park | 5,36 ± 0,10 | 141,6 ± 4,0 | 43,1 ± 1,5 | |

Примечание: ^{abc} – различия между группами статистически значимы (p ≤ 0,05). Проверка – данные отсутствуют. В таблице представлены средние значения показателей со средней арифметической ошибкой.

Note: ^{abc} – differences between the groups are statistically significant (p < 0.05). Dash – no data available. The table shows the average values of the indicators with the average arithmetic error.

в адаптации животных к ОС. В исследовании [47] отмечено, что в весенний период в крови енотовидной собаки содержалось гемоглобина 103 г/л, а в осенний – несколько выше – 120 г/л. Гематокрит у этих же животных был на уровне 31,6 и 36,4 %, соответственно (табл.). Таким образом, несмотря на значительные потери массы тела в зимний период, енотовидная собака демонстрировала высокую устойчивость к зимне-весеннему дефициту ресурсов.

Исследования серых волков (*Canis lupus* Linnaeus, 1758) в северо-восточной части Миннесоты (США) выявили сезонные циклы в гематологических показателях [48]. Уровень гематокрита, гемоглобина и количество эритроцитов у животных увеличивались с лета до зимнего максимума, а затем снова снижались к лету. Некоторые гематологические показатели значительно различались между дикими волками и волками, живущими в неволе. Также отмечены большие различия в параметрах красной крови между популяциями диких зверей.

Увеличение содержания эритроцитов и гемоглобина в крови волков в зимний период, вероятно, обусловлено уменьшением общего объёма крови у животных в этот период, когда потребление воды ограничено.

Влияние способа разведения животных на показатели красной крови

При изучении гематологического профиля некоторых видов диких и домашних пушных зверей (енотовидная собака, лисица) [49] показано, что способ разведения животных не влияет достоверно на их показатели красной крови (табл.). Например, количество эритроцитов было незначительно больше в крови диких енотовидных собак и лисиц, по сравнению с одомашненными сородичами. По уровню гематокрита наблюдали обратную ситуацию. Содержание гемоглобина было несущественно больше в крови дикой енотовидной собаки, по сравнению с енотовидной собакой клеточного разведения, а у лисиц – наоборот.

Влияние паразитарных инвазий на параметры красной крови

Климатические условия, уровень загрязнения и доступность пищевых ресурсов способствуют распространению паразитов и увеличению риска заражения ими [50]. Паразитарные инфекции оказывают значительное влияние на здоровье животных

и являются важным фактором в изменении их гематологических показателей [51].

Продемонстрировано [52], что заболевание, вызванное паразитом *Babesia canis*, приводит к значительным изменениям в гематологических показателях у собак (*Canis familiaris* Linnaeus, 1758). В этом исследовании проводилось сравнение четырёх групп животных, среди которых наибольшие отклонения в показателях крови были выявлены у собак, инвазированных *B. canis*. В частности, наблюдалось снижение количества эритроцитов, гемоглобина, гематокрита, а также уменьшение средних значений МСН (mean concentration hemoglobin – среднее содержание гемоглобина в эритроците) и МСНС (mean corpuscular hemoglobin concentration – средняя концентрация гемоглобина в эритроците). Это указывает на выраженную анемию у животных, вызванную разрушением клеток крови паразитом (табл.).

В группе собак, инвазированных только *Dirofilaria repens*, изменения были менее выраженными, однако также отмечалось снижение уровня гемоглобина, гематокрита и МСНС. В случае коинфекции *B. canis* и *D. repens* наблюдались изменения в содержании эритроцитов, гемоглобина и гематокрита, что также указывает на наличие у животных анемии и нарушение функций внутренних органов, таких как почки и печень. Степень изменений параметров красной крови зависит от типа паразита и тяжести заболевания, что подчёркивает необходимость контроля и профилактики подобных заболеваний для поддержания здоровья животных.

Влияние выхлопных газов автомобилей на показатели красной крови

Загрязнение воздуха представляет серьёзную угрозу для здоровья и системы крови [53]. Длительное воздействие загрязнённого воздуха может приводить к структурным изменениям в крови, анемии и нарушениям свёртываемости [25].

Некоторые химические вещества, такие как свинец, бензол и пестициды, могут вызывать анемию, что связано с разрушением эритроцитов или нарушением их образования. Как отмечено ранее [54], это состояние характеризуется снижением уровня эритроцитов и гемоглобина, что значительно ухудшает способность крови к транспортировке кислорода и может привести к серьёзным последствиям для здоровья. Это обусловлено тем, что угарный

газ, связываясь с гемоглобином, ограничивает способность крови переносить кислород, что стимулирует организм к увеличению производства эритроцитов для компенсации недостатка кислорода. Анемия, вызванная токсическими веществами, особенно опасна, так как разрушение эритроцитов или нарушение их образования приводит к кислородному голоданию тканей и органов.

Воздействие отработанных газов автомобилей – лишь одна из форм химического загрязнения, оказывающего вредное влияние на кровь. Химические соединения, содержащиеся в выбросах промышленных предприятий и автотранспорта, накапливаются в организме и нарушают нормальные процессы кроветворения. Исследованиями [55] показано, что влияние загрязнения воздуха на гематологические показатели варьирует в зависимости от региона и сезона, а также от уровня загрязнения. Например, наиболее низкое содержание эритроцитов, гемоглобина и гематокрита установлено при среднем уровне загрязнения ОС выхлопными газами автомобилей (табл.).

Таким образом, выхлопные газы автомобилей и другие загрязняющие вещества представляют значительную опасность для состояния крови и общего здоровья организма. Длительное воздействие этих веществ может привести к анемии, нарушению функции тромбоцитов и другим серьёзным заболеваниям, что подчёркивает необходимость принятия мер для снижения загрязнения воздуха и защиты здоровья населения.

Влияние радиоактивного излучения на параметры красной крови

Исследователи [56, 57] выявили, что на территориях, где присутствуют ионизирующие радионуклиды, у собак развиваются такие патологические состояния, как анемия, олигоцитемия (снижение числа эритроцитов) и олигохромемия (снижение уровня гемоглобина). Радиоактивное излучение приводит к нарушению процессов эритропоэза, начиная с 7 дня после загрязнения. Уровень гемоглобина снижался во всех возрастных группах. Наибольшее количество случаев анемии было зафиксировано у 14-дневных щенков. К 14 дню после радиоактивного загрязнения у щенков наблюдалось значительное уменьшение количества эритроцитов – с $5,48 \cdot 10^{12}/л$ до $3,3 \cdot 10^{12}/л$ (табл.). Это можно объяснить накопительным эффектом радиации, усугубляющим нарушения в образовании клеток крови.

Вышеуказанные данные подтверждают гипотезу о разрушительном влиянии радиации на процессы кроветворения. Особенно тревожными оказались результаты, касающиеся двухмесячных собак, т. к. в этой группе было зафиксировано наибольшее количество случаев анемии. Это может объясняться как естественными физиологическими изменениями, так и разрушительным воздействием радиации, которое усугубляет физиологические процессы, снижая уровень гемоглобина и количество эритроцитов.

Таким образом, воздействие радиоактивного излучения негативно сказывается на состоянии крови, вызывая анемию и иммунодефицитные состояния, что особенно заметно у молодых животных. Поэтому важно контролировать радиационный фон в зонах техногенных катастроф и разрабатывать меры по защите живых организмов от радиационного загрязнения.

Влияние мест обитания на показатели красной крови у животных

Местообитание является одним из ключевых экологических факторов, определяющих физиологическое состояние животных, в том числе показатели красной крови. Различия в степени антропогенной нагрузки, кормовых условиях, паразитарной инфекации и контактах с домашними животными могут отражаться на числе эритроцитов, уровне гемоглобина, величине гематокрита и эритроцитарных индексах. В связи с этим, особую ценность представляют исследования, в которых сравниваются животные одного вида, обитающие в разных типах ландшафтов.

Показательной в этом отношении является работа [58], посвящённая гематологическим и биохимическим показателям свободноживущих гривистых волков (*Chrysocyon brachyurus*) в Бразилии. Авторы обследовали 28 особей, обитающих внутри национального парка Серра-да-Канастра, в его пограничной зоне и на прилегающих фермерских территориях, что позволило оценить влияние пространственной неоднородности среды и антропогенной трансформации местообитаний на состояние животных.

Установлено, что показатели красной крови варьировали в зависимости от условий обитания. У волков, живших внутри парка, число эритроцитов было ниже, чем у животных из приграничной зоны и сельскохозяйственных угодий: около $4,5 \cdot 10^6/мм^3$ против $5,1 \cdot 10^6/мм^3$

и $5,3 \cdot 10^6/\text{мм}^3$ соответственно. Аналогичная тенденция отмечалась и по гематокриту, который возрастал от 38,0 % внутри парка до 40,7 % в приграничной зоне и 43,1 % на фермерских территориях. Кроме того, у особей из пограничной зоны наблюдалось снижение среднего объёма эритроцита, что авторы связывали с микроцитозом.

Полученные данные свидетельствуют о том, что тип местообитания и степень его антропогенной преобразованности оказывают заметное влияние на показатели красной крови у псовых. Пограничные зоны и агроландшафты характеризуются более высокой экологической нагрузкой, включая паразитарное давление и контакты с домашними животными, что может вызывать физиологические сдвиги в организме. Таким образом, показатели красной крови могут рассматриваться как чувствительный индикатор адаптационного ответа животных на изменение условий среды.

Заключение

Изложенные выше факты подчёркивают важность глубокого понимания влияния факторов ОС на параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae). Окружающая среда играет ключевую роль в поддержании здоровья животных, так как её различные факторы оказывают непосредственное воздействие на состояние крови и общее функционирование организма. Нарушения в природных экосистемах, например заражение животных паразитами, загрязнение ОС выхлопными газами автомобилей, радиоактивным излучением или изменение климатических условий, по которым выявлены статистически значимые различия между животными, могут привести к серьёзным изменениям в физиологических процессах у животных. Понимание того, как различные факторы ОС влияют на гематологические показатели животных, необходимо для разработки эффективных стратегий по охране их здоровья и поддержанию устойчивости экосистем.

Способность организма животных к адаптации и сохранению гомеостаза играет ключевую роль в поддержании их здоровья в условиях изменяющейся ОС. В работе мы постарались показать, что параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae) являются надёжными индикаторами в методах диагностики, лечения и прогнозирования заболеваний животных, поскольку изменения в этих параметрах являются индикаторами

патофизиологических реакций, обеспечивая, таким образом, базовую информацию о состоянии здоровья животных. Условия изменяющейся ОС влияют на параметры красной крови животных семейства Псовые (Canidae), поэтому их можно использовать в качестве индикаторов для оценки физиологического статуса животных и оценки изменений ОС.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания (тема FNWS-2022-0002).

References

1. Kashapova R.A. The adaptation of the organism in conditions of chemical contamination of low intensity // Modern problems of science and education. 2015. No. 3. Article 595 [Internet recourse] <https://science-education.ru/article/view?id=19710> (Accessed: 29.04.2026) (in Russian).
2. Reed M.D., Barrett E.G., Campen M.J., Divine K.K., Gigliotti A.P., McDonald J.D., Seagrave J.C., Mauderly J.L., Seilkop S.K., Swenberg J.A. Health effects of subchronic inhalation exposure to gasoline engine exhaust // Inhal. Toxicol. 2008. V. 20. No. 13. P. 1125–1143. doi: 10.1080/08958370802368722
3. Etim N., Williams M.E., Akpabio U., Offiong E.A. Haematological parameters and factors affecting their values // Agric. Sci. 2014. V. 2. No. 1. P. 37–47. doi: 10.12735/as.v2i1p37
4. Dias G., Bezerra V., Risso W.E., Martinez C.B., Simonato J.D. Hematological and biochemical changes in the Neotropical fish *Astyanax altiparanae* after acute exposure to a cadmium and nickel mixture // Water Air Soil Pollut. 2023. V. 234. No. 5. Article No. 307. doi: 10.1007/s11270-023-06325-5
5. Kanu K.C., Okoboshi A.C., Otitolaju A.A. Haematological and biochemical toxicity in freshwater fish *Clarias gariepinus* and *Oreochromis niloticus* following pulse exposure to atrazine, mancozeb, chlorpyrifos, lambda-cyhalothrin, and their combination // Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol. 2023. V. 270. Article No. 109643. doi: 10.1016/j.cbpc.2023.109643
6. Clinical Methods: The History, Physical, and Laboratory Examinations / Eds. H.K. Walker, W.D. Hall, J.W. Hurst. 3rd edition. Boston: Butterworths, 1990. 1087 p.
7. Ates B., Orun I., Selamoglu Z., Durmaz G., Yilmaz I. Effects of sodium selenite on some biochemical and hematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) exposed to Pb^{2+} and Cu^{2+} // Fish Physiol. Biochem. 2008. V. 34. No. 1. P. 53–59. doi: 10.1007/s10695-007-9146-5
8. Blanc L., Wolfe L.C. General considerations of hemolytic diseases, red cell membrane, and enzyme defects // Lanzkowsky's Manual of Pediatric Hematology and

- Oncology. 6th ed. Academic Press, 2016. P. 137–146. doi: 10.1016/B978-0-12-821671-2.00030-1
9. Kaviani E.F., Naeemi A.S., Salehzadeh A. Influence of copper oxide nanoparticle on hematology and plasma biochemistry of caspian trout (*Salmo trutta caspius*), following acute and chronic exposure // *Pollution*. 2019. V. 5. No. 1. P. 225–234. doi: 10.22059/poll.2018.251034.383
10. Niu Y., Zhang X., Xu T., Li X., Zhang H., Wu A., Storey K.B., Chen Q. Physiological and biochemical adaptations to high altitude in Tibetan Frogs, *Nanorana parkeri* // *Front. Physiol.* 2022. V. 13. Article No. 942037. doi: 10.3389/fphys.2022.942037
11. Khairy S., Abid A. Estimation of hematological parameters in people exposed to environmental pollution in Thi-Qar Governorate // *University of Thi-Qar Journal of Science*. 2023. V. 10. No. 2. P. 146–150. doi: 10.32792/utq/utjsi/v10i2.1122
12. Sabanova R.K. Seasonal changes in rodent hematologic parameters reflective their adaptive ability // *Agricultural Biology*. 2008. V. 43. No. 4. P. 117–119 (in Russian).
13. Nesterenko A.O., Tselykh E.D., Khristoforova N.K., Berdnikov N.V. Analysis of the elemental composition in blood serum and hair of adolescents of different ethnic groups in Khabarovsk Krai in connection with nutrition and technogenic contamination of territories // *Sechenov Herald*. 2018. No. 2. P. 26–32 (in Russian).
14. Khisamov E.N., Enikeyev D.A., Enikeyev O.A., Idrisova L.T. The influence of chemical pollution on the condition of red blood cells // *Modern problems of science and education*. 2017. No. 4 [Internet resource] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26677> (Accessed: 05.05.2026) (in Russian).
15. Alghamdi M.S., El-Ghazaly N.A. Effects of exposure to electromagnetic field on some hematological parameters in mice // *Open J. Med. Chem*. 2012. No. 2. P. 30–42. doi: 10.4236/ojmc.2012.22005
16. Al-Sweedan S.A., Alhaj M. The effect of low altitude on blood count parameters // *Hematology/Oncology and Stem Cell Therapy*. 2012. No. 5 (3). P. 158–161. doi: 10.5144/1658-3876.2012.158
17. Agadzhanian N.A., Skalnyy A.V., Detkov V.Y. Human elemental portrait: morbidity, demography and problem of nation health management // *Human Ecology*. 2013. V. 20. No. 11. P. 3–12 (in Russian). doi: 10.17816/humeco17282
18. Skalnyy A.V. Evaluation and correction of elemental status of the population as a perspective direction of national healthcare and environmental monitoring // *Trace Elements in Medicine*. 2018. V. 19. No. 1. P. 5–13 (in Russian). doi: 10.19112/2413-6174-2018-19-1-5-13
19. Higgins K. Interpretation of clinical laboratory. Moskva: Laboratoriya znaniy, 2021. 592 p. (in Russian).
20. Hematology: National Guidelines / Ed. O.A. Rukavicyn. Moskva: GEOTAR-Media, 2024. 920 p. (in Russian).
21. Pavlova V.Y. How to interpret complete blood count: using the possibilities of modern hematology analyzers // *Fundamental and Clinical Medicine*. 2016. V. 4. No. 1. P. 98–108 (in Russian).
22. Aniolek O. The effect of thyroid hormone deficiency on erythropoiesis in dogs // *ACTA VET. BRNO*. 2019. V. 88. P. 257–264. doi: 10.2754/avb201988030257
23. Alabi O.M., Aworinde H.O., Adebayo S., Akinwumi A.O., Ayandiji A., Tatar A. Data analytics-based evaluation of blood indices and adaptation of medicated and non-medicated broiler chickens under humid tropical conditions // *Transl. Anim. Sci.* 2024. V. 16. No. 8. Article No. txae040. doi: 10.1093/tas/txae040
24. Nizhelskaya E.I. Hematological and biochemical indices dynamics in dogs with toxocarosis // *International Research Journal*. 2020. No. 8-2 (98). P. 75–79 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2020.98.8.047
25. German S.V., Bobrovnikskii I.P., Balakaeva A.V. The impact of air pollution with particulate matter on the development of cardiovascular diseases (literature review) // *Hygiene and Sanitation*. 2021. V. 100. No. 6. P. 555–559 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2021-100-6-555-559
26. Dvoeglazova N.V., Kokorina A.E., Berezina Yu.A., Nani A.E. Morphometry of blood cells in anemia of hemoparasitic origin in dogs // *Dagestan GAU Proceedings*. 2022. No. 4 (16). P. 171–176 (in Russian). doi: 10.52674/26867591_2022_4_171
27. Zhdanova O.B., Okulova I.I., Chasovskikh O.V., Uspensky A.V., Berezina Yu.A. Morphological and hematological indicators for particularly dangerous nematodes in raccoon dogs in the Kirov region // *Krolikovodstvo i Zverovodstvo*. 2023. No. 5. P. 41–48 (in Russian). doi: 10.52178/00234885_2023_5_41
28. Kosmachevskaya O.V., Topunov A.F. Alternate and additional functions of erythrocyte hemoglobin // *Biochemistry (Moscow)*. 2018. V. 83. P. 1575–1593. doi: 10.1134/S0006297918120155
29. Repsold L., Joubert A.M. Eryptosis: an erythrocyte's suicidal type of cell death // *Biomed. Res. Int.* 2018. V. 3. Article No. 9405617. doi: 10.1155/2018/9405617
30. Rizzotti D., Manfrin C., Gerdol M., Greco S., Santovito G., Giulianini P.G. Morphological analysis of erythrocytes of an Antarctic teleost under heat stress: Bias of the stabling effect // *J. Therm. Biol.* 2022. V. 103. Article No. 103139. doi: 10.1016/j.jtherbio.2021.103139
31. Singh A.P., Maurya N.K., Saxena R., Saxena S. An overview of red blood cell properties and functions // *J. Int. Res. Med. Pharm. Sci.* 2024. V. 19. No. 2. P. 14–23. doi: 10.56557/JIRMEPS/2024/v19i28667
32. Isaac L.J., Abah G., Akpan B., Ekaette I.U. Haematological properties of different breeds and sexes of rabbits // *Proceedings of the 18th Annual Conference of Nigerian Society of Animal Science*. 2013. V. 294. P. 24–27.
33. Mairbäurl H. Red blood cells in sports: effects of exercise and training on oxygen supply by red blood cells // *Front. Physiol.* 2013. No. 4. Article No. 332. doi: 10.3389/fphys.2013.00332
34. Abrasheva M.V., Andreeva A.I., Vinogradova O.E., Viktorovich N.N. Red blood cell hemoglobin: types, values, alternative and additional functions // *International*

- Journal of Applied and Fundamental Research. 2021. No. 7. P. 7–11 (in Russian). doi: 10.17513/mjpf.13240
35. Ponnuraj S.M., Kamariah N., Moovarkumudalvan B., Ramadoss R., Ponnuswamy M.N. Molecular insights of an avian species with low oxygen affinity, the crystal structure of duck T-state methemoglobin // *Protein J.* 2024. V. 43. P. 771–781. doi: 10.1007/s10930-024-10206-z
 36. Chineke C.A., Ologun A.G., Ikeobi C.O.N. Haematological parameters in rabbit breeds and crosses in humid tropics // *Pakistan Journal of Biological Sciences.* 2006. No. 9 (11). P. 2102–2106. doi: 10.3923/pjbs.2006.2102.2106
 37. Zenina M.N., Kozlov A.V., Bessmeltsev S.S., Chernysh N.Y. Additional laboratory markers for monitoring iron deficiency // *Bulletin of the North-West State Medical University named after I. I. Mechnikov.* 2014. No. 6. P. 34–42 (in Russian).
 38. Doig K., Zhang B.A. A methodical approach to interpreting the red blood cell parameters of the complete blood count // *American Society for Clinical Laboratory Science.* 2017. V. 30. No. 3. P. 173–185. doi: 10.29074/ascls.30.3.173
 39. Lescano J., Quevedo M., Villalobos M., Gavidia C. Hematology and serum biochemistry of free-ranging and captive Sechuran foxes (*Lycalopex sechurae*) // *Vet. Clin. Pathol.* 2018. V. 47. No. 1. P. 29–37. doi: 10.1111/vcp.12568
 40. Daramola J.O., Adeloye A.A., Fatoba T.A., Soladoye A.O. Haematological and biochemical parameters of West African Dwarf goats // *Livestock Research for Rural Development.* 2005. No. 17 (8). Article No. 95.
 41. Radkowska L., Herbut E. Hematological and biochemical blood parameters in dairy cows depending on the management system // *Animal Science Papers and Reports.* 2014. V. 32. No. 4. P. 317–325.
 42. Lee S.H., Kim J.W., Lee B.C., Oh H.J. Age-specific variations in hematological and biochemical parameters in middle- and large-sized of dogs // *J. Vet. Sci.* 2019. V. 21. No. 1. P. e7. doi: 10.4142/jvs.2020.21.e7
 43. Rui P., Ma Z., Zhang X., Li P., Gao G., Yang Z., Zhang J. Hematology and serum biochemistry values in adult racoon dogs and foxes in Changli farms of Hebei Province, China // *African J. Microbiol. Res.* 2011. No. 5 (26). P. 4667–4672. doi: 10.5897/AJMR11.932
 44. Berezina Y.A., Bespyatykh O.Y., Berezin K.N. Haematology of raccoon dog blood in the natural and climatic conditions of Kirov oblast // *Journal of Agriculture and Environment.* 2023. No. 6 (34). Article No. 10 (in Russian). doi: 10.23649/JAE.2023.34.7
 45. Sanzhieva S.E., Mantatova N.V. Changes in morphological and biochemical status of blood silver-black foxes under domestication // *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. Geografiya.* 2009. No. 4. P. 197–200 (in Russian).
 46. Piotrowska A., Szymeczko R., Ożgo M., Bogusławska-Tryk M., Burlikowska K. Morphological and mineral characteristics of peripheral blood in female polar fox in relation to age // *Folia Biologica.* 2008. V. 56. No. 3–4. P. 263–267. doi: 10.3409/fb.56_3-4.263-267
 47. Mustonen A.M., Nieminen P. A review of the physiology of a survival expert of big freeze, deep snow, and an empty stomach: the boreal raccoon dog (*Nyctereutes procyonoides*) // *J. Comp. Physiol.* 2018. V. 188. P. 15–25. doi: 10.1007/s00360-017-1114-5
 48. Mech L.D., Buhl D.A. Seasonal cycles in hematology and body mass in free-ranging gray wolves (*Canis lupus*) from Northeastern Minnesota, USA // *J. Wild. Dis.* 2020. V. 56. No. 1. P. 179–185. doi: 10.7589/2018-06-156
 49. Bozena N.-D., Andrzej Z., Andrzej J., Wioletta W. Hematological parameters of wild and farm mink, red fox and raccoon dog // *Medycyna Weterynaryjna.* 2013. V. 69. No. 1. P. 40–42.
 50. Savić S., Stosic M.Z., Marcic D., Hernández I., Potkonjak A., Otasevic S., Ruzic M., Morchón R. Seroepidemiological study of canine and human dirofilariasis in the endemic region of Northern Serbia // *Front. Vet. Sci.* 2020. No. 7. Article No. 571. doi: 10.3389/fvets.2020.00571
 51. Wyszmołek M.E., Dobrzyński A., Długosz E., Czopowicz M., Wiśniewski M., Jurka P., Klockiewicz M. Hematological and biochemical changes in dogs naturally infected with *Dirofilaria repens* // *Front. Vet. Sci.* 2020. No. 7. Article No. 590. doi: 10.3389/fvets.2020.00590
 52. Wężyk D., Romanczuk K., Rodo A., Kavalevich D., Bajer A. Haematological indices and immune response profiles in dogs naturally infected and co-infected with *Dirofilaria repens* and *Babesia canis* // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. Article No. 2028. doi: 10.1038/s41598-023-29011-2
 53. Kargarfard M., Shariat A., Shaw B.S., Shaw I., Lam E.T.C., Kheiri A., Eatemadyboroujeni A., Tamrin S.B.M. Effects of polluted air on cardiovascular and hematological parameters after progressive maximal aerobic exercise // *Lung.* 2015. V. 193. P. 275–281. doi: 10.1007/s00408-014-9679-1
 54. Nikolic M., Nikić D., Stanković A. Effects of air pollution on red blood cells in children // *Polish J. Environ. Stud.* 2008. V. 17. No. 2. P. 267–271.
 55. Asghar M.S., Rehman Z., Shafiq H., Khaliq F., Mughal Z. Seasonal and regional effects of air quality index on hematological indices of dogs under local environmental conditions in Pakistan // *BioSight.* 2022. V. 3. No. 1. P. 3–10. doi: 10.46568/bios.v3i1.62
 56. Duboviy A.A., Dubova O.A., Sheremet S.I. The state of hematopoiesis and the functional state of the liver and kidneys in dogs, grown in conditions of chronic exposure to radioactive contamination // *Scientific Messenger LNUVMB.* 2017. V. 19. No. 82. P. 217–221 (in Ukrainian).
 57. Duboviy A.A. Changes of morphological and biochemical parameters of blood of puppies raised in the conditions of influence of ionizing irradiation // *Scientific Bulletin of the LNUVMBT named after S.Z. Gzhitskiy.* 2016. V. 18. No. 1 (65). P. 27–32 (in Ukrainian).
 58. May-Júnior J.A., Songsasen N., Azevedo F.C.C., Santos J.P., Paula R.C., Rodrigues F.H.G., Rodden M.D., Wildt D.E., Morato R.G. Hematology and blood chemistry parameters differ in free-ranging maned wolves (*Chrysocyon brachyurus*) living in the Serra da Canastra National Park versus adjacent farmlands, Brazil // *Journal of Wildlife Diseases.* 2009. V. 45. No. 1. P. 81–90. doi: 10.7589/0090-3558-45.1.81

Использование биомассы микроводорослей для улавливания CO₂ из дымовых газов и получения биодизеля (обзор)

© 2026. А. Н. Чусов, к. т. н., доцент, П. С. Шинкевич, инженер, Н. А. Политаева, д. т. н., профессор, К. А. Вельможина, инженер, А. М. Опарина, ассистент, Н. В. Зибарев, к. т. н., ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, e-mail: annaoparina93@gmail.com

Значительное количество промышленных предприятий, в особенности энергетической отрасли, связаны с выбросами дымовых парниковых газов, в результате чего образуется большое количество углекислого газа (CO₂). Утилизация CO₂, содержащегося в дымовых газах, в особенности ТЭС и ТЭЦ, возможна при культивировании микроводорослей, поскольку эффективность биофиксации у них значительно выше, чем у высших растений. В статье приводится обзор и анализ мирового опыта использования микроводорослей для поглощения CO₂ с перспективой использования биомассы микроводорослей для получения биодизеля. Обосновывается неоспоримый потенциал применения микроводорослей в качестве перспективной технологии, способствующей значительному сокращению выбросов парниковых газов в атмосферу с дымовыми газами промышленных предприятий. Липиды микроводорослей являются перспективным сырьём для производства биодизеля, применяемого в транспортном секторе. Однако реализация данной технологии требует комплексной оценки параметров культивирования, включая состав дымовых газов, температурные режимы и селекцию подходящих штаммов. Приведена экономическая оценка получения биодизеля из биомассы микроводорослей и показано, что целесообразно получать биодизельное топливо из биомассы при её культивировании в больших масштабах.

Ключевые слова: биомасса, микроводоросли, углекислый газ, биотопливо, биодизель.

Using microalgae biomass to capture CO₂ from flue gases and produce biodiesel: a review

© 2026. A. N. Chusov ORCID: 0000-0002-1388-8649, P. S. Shinkevich ORCID: 0009-0002-3627-281X, N. A. Politaeva ORCID: 0000-0002-5914-6210, K. A. Velmozhina ORCID: 0000-0001-9623-057X, A. M. Oparina ORCID: 0000-0002-2043-1866, N. V. Zibarev ORCID: 0000-0002-8710-6304, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, Russia, 195251, e-mail: annaoparina93@gmail.com

A significant number of industrial enterprises, particularly in the energy sector, emit greenhouse gases, resulting in the formation of large quantities of carbon dioxide (CO₂). Capturing CO₂ contained in flue gases, particularly from thermal and combined heat and power plants, is possible for microalgae cultivation, as their biofixation efficiency is significantly higher than that of plants. Flue gases can serve as a source of CO₂ and nutrients for microalgae cultivation. Thus, modern technologies make it possible to convert polluting flue emissions into valuable products. Moreover, microalgae can be used as a basis for creating a range of useful substances, including biodiesel. Vegetable and animal oils are the source of biodiesel today, but these feedstocks cannot fully replace traditional diesel fuel due to the large land resources required for growing oilseeds. Biodiesel is considered a renewable fuel because it can be produced by converting oils. Microalgae convert carbon dioxide and, in some countries, are the only source of biodiesel fuel with the potential to completely replace fossil fuels. This article reviews and analyzes global experience using microalgae to absorb CO₂, with potential for using microalgae biomass to produce biodiesel. The undeniable potential of microalgae as a promising technology for significantly reducing greenhouse gas emissions from industrial flue gases is substantiated. Microalgal lipids represent a promising feedstock for biodiesel production in the transportation sector. However, successful implementation of this technology requires comprehensive evaluation of cultivation parameters, including flue gas composition, temperature regimes, and selection of appropriate microalgal strains. An economic assessment of biodiesel production from microalgae biomass is presented, demonstrating the feasibility of producing biodiesel from biomass cultivated on a large scale.

Keywords: biomass, microalgae, carbon dioxide, biofuel, biodiesel.

Постоянный рост спроса на энергию в мире, а также негативное воздействие традиционных ископаемых источников энергии на окружающую среду стимулируют развитие возобновляемых источников энергии. Дымовые газы выделяются при сжигании угля на электростанциях и в основном состоят из CO_2 , N_2 , O_2 и водяного пара. В меньших концентрациях присутствуют NO_x , SO_x , CO , C_xH_y , а также частицы тяжёлых металлов и твёрдые вещества.

Эксперты, участвовавшие в 27-й Конференции Рамочной конвенции Организации Объединённых Наций об изменении климата в 2022 г., согласились с тем, что ущерб от климатических изменений при росте температуры на 1,5 градуса будет существенно меньше, чем при прогнозируемых 2 градусах. Для сдерживания потепления в пределах 1,5 градусов необходимо резко уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу. К 2030 г. их объём должен сократиться на 43 % относительно показателей 2019 г. В итоговом документе содержится призыв к активным действиям в этом направлении. При этом подчёркивается важность учёта технологических возможностей и национальных особенностей стран в контексте устойчивого развития и борьбы с бедностью. Особое внимание в документе уделяется необходимости постепенного отказа от угольной энергетики и неэффективных субсидий на ископаемое топливо.

Основным направлением работ в сфере менеджмента электростанций, работающих на угольном ископаемом топливе, в экономически развитых странах является снижение экологического воздействия дымовых газов. Данная тенденция прослеживается во многих передовых разработках, внедрение которых происходит на электростанциях. В числе таких технологий можно выделить, например, системы десульфурации дымовых газов, селективного каталитического и некаталитического восстановления [1] и др.

Технологии по улавливанию, хранению и использованию углерода (Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)) представляют собой современное экологичное и энергоэффективное решение проблемы выбросов дымовых газов в атмосферу. В основном данные методы подразделяются по принципу их реализации на физико-химические, мембранные, термические, криогенные и биологические. Каждый из методов имеет ряд преимуществ и недостатков, определяемых стоимостью необходимого оборудования, затратами на восстановление фильтрационной системы, а

также задействованными площадями и территориями. Однако, именно биологическая фиксация CO_2 наиболее привлекательна как для исследователей, так и для предпринимателей, благодаря возможности реализации замкнутой декарбонизированной системы с получением различных продуктов с добавленной стоимостью – биодизеля, биоводорода и т. д. [2–5]. При этом получаемое биотопливо является биоразлагаемым, возобновляемым и нетоксичным ресурсом. Наиболее распространённым способом производства биодизельного топлива является переэтерификация масел спиртом в присутствии катализатора с получением метиловых эфиров жирных кислот и глицерина [6]. Микроводоросли являются возобновляемым ресурсом, поэтому их использование в качестве источника биотоплива является особенно актуальным. Микроводоросли являются сырьём для производства масел с высоким содержанием липидов [7, 8], они характеризуются быстрыми темпами роста и способны расти даже в солёных водах.

Актуальность проведённого исследования обусловлена необходимостью снижения выбросов CO_2 в промышленности и поиска эффективных методов его утилизации. Биологическая фиксация CO_2 с использованием микроводорослей является перспективным решением, позволяющим одновременно сокращать выбросы и получать ценные продукты, включая биодизель. В отличие от традиционных методов улавливания CO_2 , данный подход сочетает экологическую эффективность с возможностью коммерческого использования биомассы микроводорослей.

Проведённая в статье экономическая оценка подтверждает рентабельность технологии при её масштабировании. Таким образом, данное исследование вносит вклад в развитие низкоуглеродной экономики и возобновляемой энергетики, предлагая инновационные решения для промышленного сектора.

Цель данного исследования заключается в обзоре и анализе мирового опыта использования микроводорослей для поглощения CO_2 с перспективой использования биомассы микроводорослей для получения биодизеля.

Объекты и методы исследования

В рамках исследования проведён анализ наиболее значимых научных исследований современных российских и зарубежных учёных за последние двадцать пять лет по использованию микроводорослей для поглощения CO_2

с перспективой переработки их биомассы в биодизель.

В этой статье приведён обобщённый анализ материалов научных статей, найденных в базах данных: Scopus, Google Scholar, eLIBRARY, а также в сети ResearchGate.

Поиск произведён путём использования таких поисковых запросов: биомасса + микроводоросли, углекислый газ + микроводоросли, улавливание CO₂ + микроводоросли, биодизель + микроводоросли, биотопливо + микроводоросли, biomass + microalgae, carbon dioxide + microalgae, CO₂ capture + microalgae, biodiesel + microalgae, biofuel + microalgae.

Ключевые публикации по анализируемой теме, представленные и изученные в данной работе, опубликованы в период с 2008-го по 2024 гг. Данный временной промежуток характеризуется наиболее активными исследованиями в области использования биомассы микроводорослей для улавливания CO₂ из дымовых газов и получения биодизеля.

Выращивание микроводорослей, их культивирование и производство биомассы

На сегодняшний день биотопливо получают в твёрдом, жидком и газообразном виде из различных органических веществ. По происхождению выделяют первичное биотопливо (древесина, щепа, топливные брикеты) и вторичное биотопливо, которое подразделяют на три поколения:

– I поколение, получаемое из пищевого сырья (крахмал, сахар): биоэтанол, биодизель из зерновых культур, сахарного тростника, сахарной свёклы;

– II поколение, производимое из непищевого сырья (целлюлоза, лигноцеллюлоза): биоэтанол и биодизель из соломы, кукурузных початков, картофельной ботвы, древесных и тростниковых отходов;

– III поколение, синтезируемое из микроводорослей и макрофитов (мангровые растения, мискантус), а также из отходов животноводства и пищевой промышленности.

Первичное биотопливо используется в натуральном виде: это древесина для каминов, готовки или генерации электричества. Вторичное биотопливо (биоэтанол и биодизель) проходит специальную обработку и подходит для машин и промышленного применения. Развиваясь, технологии производства вторичного биотоплива прошли через три этапа. Каждое из них отличалось новыми методами переработ-

ки, видом сырья и уровнем технологического развития [9]. При этом технологии I поколения имели серьёзные недостатки с точки зрения экономики и влияния на окружающую среду. Основная проблема биотоплива нового поколения заключается в том, что по мере увеличения производственных мощностей растёт и его конкуренция с сельским хозяйством за пахотные земли, используемые для производства продуктов питания. Второе поколение биотоплива производится из древесины, богатой лигноцеллюлозной биомассой. В отличие от производства топлива I поколения, оно не конкурирует с производством продуктов питания. Для его получения используют различные растительные отходы: сельскохозяйственные отходы с полей (например, солому), обрезки от лесозаготовки и деревообработки (включая листья и древесную щепу), а также несъедобные части таких культур, как кукуруза и сахарный тростник [10]. Третье поколение биотоплива, основным ресурсом для получения которого является биомасса микроводорослей, является перспективной альтернативой своим предшественникам (I и II поколения биотоплива), обходящей недостатки их производства [9]. При этом выработка сырья для производства биодизеля (масел) микроводорослями значительно (в 15–300 раз) превосходит выработку масла сельскохозяйственными растениями, что определяет энергоэффективность данного процесса.

Для успешного внедрения биодизель должен быть конкурентоспособен по цене с традиционным дизельным топливом. Ключевым фактором стоимости биодизеля (60–75 %) является цена исходного сырья [11]. Производство биодизеля из микроводорослей имеет существенные экономические преимущества. Во-первых, не требуется больших площадей сельскохозяйственных земель, во-вторых, энергетическая продуктивность на 1 га значительно выше, чем у традиционных культур [12]. В природе микроводоросли растут, используя солнечный свет, поглощая CO₂ из воздуха и питательные вещества из воды. При искусственном выращивании важно создать и оптимизировать именно такие условия для максимального роста. Микроводоросли могут питаться фотоавтотрофно и гетеротрофно, что возможно только кратковременно при недостаточном освещении. Однако некоторые виды способны сочетать оба процесса в миксотрофном режиме, что делает их особенно перспективными для промышленного выращивания [13].

В работе [14] представлен обзор возможных типов метаболизма микроводорослей с детальным анализом физиологической пластичности микроводорослей в ответ на изменение внешних условий. Особое внимание уделяется способности различных штаммов микроводорослей реализовывать альтернативные метаболические пути – от строго фотоавтотрофного роста с использованием световой энергии и неорганического углерода до гетеротрофного метаболизма при наличии органических субстратов. Важно отметить, что многие исследованные виды (в частности, представители родов *Chlorella*, *Scenedesmus* и *Chlamydomonas*) демонстрируют выраженную метаболическую гибкость, позволяющую им эффективно переключаться между различными типами питания в зависимости от доступности света, концентрации CO_2 и наличия органических соединений в культуральной среде. Эта адаптивная способность представляет практический интерес для промышленного культивирования, так как открывает возможности для оптимизации производственных процессов в меняющихся условиях.

В исследовании [15] проведён анализ кинетических и стехиометрических закономерностей энергетического и углеродного метаболизма микроводорослей при различных режимах культивирования. Авторы систематизировали экспериментальные данные по влиянию ключевых факторов на эффективность фотосинтетических процессов: интенсивность освещения (в диапазоне 50–2000 мкмоль/м²·с), концентрация CO_2 (от 0,04 до 20 %), соотношение макро- и микроэлементов в питательной среде, а также наличие органических субстратов (глюкоза, ацетат). На основе полученных результатов предложены математические модели, описывающие взаимосвязь между параметрами роста, накоплением биомассы и потреблением углерода. Особенно значимым является установление оптимальных соотношений C:N:P для различных физиологических состояний клеток, что позволяет прогнозировать эффективность биоконверсии CO_2 в биомассу. Полученные в работе [15] количественные зависимости имеют фундаментальное значение для проектирования промышленных фотобиореакторов и разработки стратегий управления условиями культивирования с целью максимизации продуктивности биомассы.

Комплексный анализ работ [14, 15] демонстрирует, что понимание метаболической гибкости микроводорослей в сочетании с

количественным описанием кинетических параметров их роста создаёт научную основу для разработки энергоэффективных и экономически выгодных технологий биоутилизации углерода. Это особенно актуально для решения задач снижения антропогенных выбросов CO_2 и создания устойчивых систем производства возобновляемых источников энергии.

Как видно из таблицы 1, производство микроводорослей в открытых водоёмах зависит от местного климата и сложно поддаётся контролю. Кроме того, важным недостатком этой системы выращивания является загрязнение водоёмов, а также постоянное испарение воды при воздействии солнечного тепла. Высокие показатели продуктивности в открытых водоёмах достигаются со штаммами водорослей, устойчивыми к суровым условиям среды культивирования (*Dunaliella* sp., *Spirulina* sp. и *Chlorella* sp.).

Закрытые системы для культивирования биомассы превосходят свои открытые аналоги благодаря более точной системе контроля условий культивирования, влияющих на продуктивность биомассы [17], компактности, сниженным показателям потери и испарения воды, а также более высокой эффективности улавливания CO_2 . Тем не менее, для контроля температуры выращивания требуются системы охлаждения и обогрева [16]. На основании литературных данных [18] проведён сравнительный анализ скорости роста и способности к фиксации CO_2 биомассой различных микроводорослей (табл. 2).

Таким образом, микроводоросли могут являться перспективным сырьём для получения различных форм биотоплива (биогаз, керосин, этанол, биодизель, биоводород) благодаря их быстрым темпам роста, способности фиксировать парниковые газы и высокой скорости производства липидов [16]. Основными методами получения биотоплива из биомассы микроводорослей являются анаэробное сбраживание, пиролиз, газификация, каталитический крекинг, переэтерификация [19–22]. При этом предполагается, что биотопливо, полученное из микроводорослей, будет углеродно-нейтральным, поскольку углерод, выделяющийся при его сжигании, был ранее поглощён микроводорослями из дымовых газов в процессе культивирования, что обеспечивает замкнутый углеродный цикл [23].

Согласно литературным данным, количество липидов и полиненасыщенных жирных

Таблица 1 / Table 1

Сравнительный анализ показателей производства микроводорослей в открытых и закрытых биореакторах
Comparative analysis of microalgae production indicators in open and closed bioreactors [16]

| Показатель Indicator | Открытые системы Open systems | Закрытые системы (фотобиореакторы) Closed systems (photobioreactors) |
|---|---|---|
| Место размещения / Location | Важно / Important | Не принципиально Not critical |
| Соотношение площадь/объём Surface area/volume ratio | Низкое (5–10 м ⁻¹) Low (5–10 m ⁻¹) | Высокое (20–200 м ⁻¹) High (20–200 m ⁻¹) |
| Испарение / Evaporation | Значительное / Significant | Незначительное / Negligible |
| Потери воды / Water losses | Очень высокое / Very high | Низкое / Low |
| Потери CO ₂ / CO ₂ losses | Высокое / High | Низкое / Low |
| Температура культивирования водорослей / Algae cultivation temperature | Высокая вариативность High variability | Необходимо охлаждение Cooling required |
| Метеозависимость Weather dependency | Высокая / High | Низкая / Low |
| Управление технологическим процессом / Process control | Сложное / Complex | Простое / Simple |
| Эффективность сбора биомассы Harvesting efficiency | Низкая / Low | Высокая / High |
| Очистка / Cleaning | Отсутствует / Absent | Требуется / Required |
| Виды водорослей / Algae species | Ограничены / Limited | Вариабельны / Variable |
| Качество биомассы / Biomass quality | Вариабельно / Variable | Воспроизводимо Reproducible |
| Плотность биомассы Biomass density | Низкая / Low | Высокая / High |
| Эффективность сбора Collection efficiency | Низкая / Low | Высокая / High |
| Стоимость заготовки Harvesting cost | Высокая / High | Низкая / Low |
| Эффективность использования света Light use efficiency | Низкая / Low | Хорошая / Good |
| Наиболее затратные параметры Most costly parameters | Перемешивание культуры Culture mixing | Контроль кислорода и температуры / Oxygen and temperature control |
| Контроль загрязнения Contamination control | Затруднён / Difficult | Простой / Easy |
| Капиталовложения Capital investment | Незначительные / Low | Высокие / High |
| Продуктивность / Productivity | Низкая / Low | В 3–5 раз продуктивнее открытых систем 3–5 times more productive than open systems |
| Гидродинамическая нагрузка на водоросли Hydrodynamic stress on algae | Очень низкая / Very low | От низкой до высокой From low to high |
| Контроль газоперекачки Gas transfer control | Низкий / Low | Высокий / High |

Таблица 2 / Table 2

Сравнительный анализ скорости роста и способности к фиксации CO₂ биомассой различных микроводорослей
Comparative analysis of growth rate and CO₂ fixation capacity of different microalgae biomass [18]

| Виды микроводорослей Microalgal species | Концентрация CO ₂ в среде (%) или источник углерода / CO ₂ concentration in medium (%) or carbon source | Удельные темпы роста (сутки) Specific growth rates (day ⁻¹) | Продуктивность биомассы (мг/л·сутки) Biomass productivity (mg/L·day) | Норма расхода CO ₂ (мг/л·сутки) CO ₂ consumption rate (mg/L·day) | Режим культивирования Cultivation mode | Тип фотобиореактора Photobioreactor type |
|--|---|--|---|---|---|---|
| <i>Anabaena</i> sp. | Воздух Air | – | – | 1450 | Непрерывный Continuous | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Aphanothece microscopica</i> | 15 | – | 770 | 1440 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>A. microscopica</i> | 15 | – | 1250 | 5435 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Botryococcus braunii</i> | – | 0,5 | 900 | 1000 | Пакетный Batch | – |
| <i>Chlorella emersonii</i> | Воздух / Air | 0,38 | 41 | 77 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>Chlorella kessleri</i> | 6 | 0,27 | 87 | 164 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>C. kessleri</i> | 6 | 0,38 | 65 | 122 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>Chlorella</i> sp. | 2 | 0,492 | 171 | 857 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Chlorella</i> sp. | 5 | – | 335 | 700,2 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>Chlorella</i> sp. | 10 | 0,252 | 381,8 | 717,8 | Пакетный Batch | Воздушный лифт Air-lift |
| <i>Chlorella</i> sp. | 10 | 0,11 | 610 | 1147 | Полунепрерывный Semi-continuous | Воздушный лифт Air-lift |
| <i>Chlorella</i> sp. | 10 | – | 940 | 1767 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Chlorella</i> sp. | 20 | 5,76 | 700 | 1316 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>Chlorella vulgaris</i> | 0,09 | – | 150 | 3450 (макс / max) | Пакетный Batch | Мембранный Membrane |
| <i>C. vulgaris</i> | 0,8–1,0 | – | – | 6240 (макс / max) | Пакетный Batch | Мембранный Membrane |
| <i>C. vulgaris</i> | 10 | – | 273 | 612 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>C. vulgaris</i> | Воздух / Air | 0,4 | 40 | 75 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>Chlorococcum littorale</i> | 20 | 1,8 | 530 | 900 | Пакетный Batch | – |
| <i>Euglena gracilis</i> | 10 | 0,96 | 153 | 382 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |

| Виды микроводорослей Microalgal species | Концентрация CO ₂ в среде (%) или источник углерода / CO ₂ concentration in medium (%) or carbon source | Удельные темпы роста (сутки) Specific growth rates (day ⁻¹) | Продуктивность биомассы (мг/л·сутки) Biomass productivity (mg/L·day) | Норма расхода CO ₂ (мг/л·сутки) CO ₂ consumption rate (mg/L·day) | Режим культивирования Cultivation mode | Тип фотобиореактора Photobioreactor type |
|--|---|--|---|---|---|---|
| <i>Microcystis aeruginosa</i> | 10 | – | 220 | 520,8 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Microcystis ichthyoblabe</i> | 10 | – | 232 | 489,6 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Nannochloris</i> sp. | 15 | – | 320 | 601 | Пакетный Batch | – |
| <i>Nannochloropsis</i> sp. | 15 | – | 270 | 508 | Пакетный Batch | – |
| <i>Phaeodactylum tricornutum</i> | 15 | – | 150 | 282 | Пакетный Batch | – |
| <i>Scenedesmus obliquus</i> | 6 | 0,26 | 85 | 160 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>S. obliquus</i> | 6 | 0,22 | 105 | 198 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>S. obliquus</i> | 10 | 1,19 | 292,5 | 549,9 | Пакетный Batch | – |
| <i>S. obliquus</i> | 12 | 0,22 | 140 | 263 | Непрерывный Continuous | Трубчатый Tubular |
| <i>Scenedesmus</i> sp. | 10 | – | 188 | 460,8 | Пакетный Batch | Барботажная колонна / Bubble column |
| <i>Scenedesmus</i> sp. | 10 | – | 217,5 | 408,9 | Пакетный Batch | – |
| <i>Spirulina</i> sp. | 6 | 0,44 | 200 | 376 | Непрерывный Continuous | Трубчатый Tubular |
| <i>Spirulina</i> sp. | 6 | 0,42 | 210 | 394 | Пакетный Batch | Трубчатый Tubular |
| <i>Synechocystis aquatilis</i> | – | 5,5 | 590 | 1500 | Пакетный Batch | – |

Примечание (здесь и в таблице 3): прочерк – нет данных.
Note (here and Table 3): dash – no data.

кислот обратно пропорционально интенсивности света и температуре культивирования микроводорослей. Изучение влияния концентрации CO₂ на рост *C. kessleri*, показало, что при культивировании с низким содержанием CO₂ биомасса содержит высокое значение α-линолеата [23]. У мутантного вида *Chlamydomonas reinhardtii* высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот было обнаружено в культурах с высокой concentra-

цией CO₂. Реакция среды (pH) также может влиять на липидный обмен. Низкий уровень pH вызывает стресс у *Chlamydomonas* sp. и увеличивает общее содержание липидов по сравнению с более высокими значениями pH. Однако у *Chlorella* sp. щелочные значения pH приводили к накоплению триацилглицеридов [19].

В последние годы мировые исследования сосредоточены на оценке эффективности по-

глощения CO₂ микроводорослями и цианобактериями [24–29], поскольку они могут расти и поглощать CO₂ гораздо быстрее, чем наземные растения. Микроводоросли демонстрируют впечатляющую способность к поглощению CO₂, превосходя в этом высшие растения в 10–50 раз. При этом они эффективно используют солнечный свет, достигая насыщения фотосинтеза при освещённости, составляющей около 30 % от полного солнечного излучения – то есть при интенсивности 1700–2000 мкмоль/м²·с⁻¹ [30]. Эти микроорганизмы относительно просты в культивировании при стандартных условиях выращивания, поскольку для их роста необходимы только свет, CO₂, минеральные соли (азот, фосфор, калий) и вода. Они способны быстро производить значительные объёмы липидов.

Биомасса микроводорослей и цианобактерий находит применение в четырёх основных направлениях: производство биотоплива, повышение эффективности улавливания углерода за счёт переработки дымовых газов, экономия энергии на очистных сооружениях, снижение выбросов CO₂ со сточными водами [29].

Микроводоросли могут поглощать CO₂ из трёх источников: атмосферного воздуха, выбросов промышленных предприятий, растворимых карбонатов (солей угольной кислоты).

Основной способ поглощения углерода микроводорослями – это захват атмосферного CO₂, однако этот способ ограничен тем, что в атмосфере содержится всего около 360 ppm [13, 31, 32]. Значительно эффективнее оказывается улавливание CO₂ из промышленных дымовых газов. Электростанции, работающие

на ископаемом топливе, выбрасывают до 20 % CO₂, что существенно повышает эффективность поглощения [33]. Способность микроводорослей фиксировать CO₂ напрямую связана со скоростью их роста и эффективностью использования света. При этом высокая температура снижает эффективность фотосинтеза, т. к. CO₂ хуже растворяется в тёплой воде [30, 34]. Использование промышленных дымовых газов имеет свои сложности: низкое давление газов, необходимость дополнительных энергозатрат для их подачи в систему, риск загрязнения системы пылью и тяжёлыми металлами [29].

Промышленные дымовые газы включают 10–20 % CO₂ [28], а также небольшие примеси SO_x и NO_x. В таблице 3 проведён сравнительный анализ характеристик роста и эффективности фиксации CO₂ биомассой микроводорослей при различных концентрациях CO₂, температуре и содержании NO_x/SO_x [28].

Ограничителем роста микроводорослей, как и других фотосинтетиков, прежде всего является свет, который определяет их продуктивность [28]. По этой причине требуется повышение эффективности использования света, которая обычно зависит от увеличения площади поверхности и сокращения светового пути и толщины слоя культуры микроводорослей [30]. Кроме того, виды, показывающие высокие темпы роста в естественном цикле дня и ночи, подходят для крупномасштабных систем выращивания на открытом воздухе, а штаммы, которые также могут непосредственно использовать CO₂ из дымовых газов электростанций, являются наиболее предпочтительными [28, 35].

Таблица 3 / Table 3

Сравнительный анализ характеристик роста и эффективности фиксации CO₂ биомассой микроводорослей при различных концентрациях CO₂, температуре и содержании NO_x/SO_x
Comparative analysis of growth characteristics and CO₂ fixation efficiency of microalgae biomass at different CO₂ concentrations, temperatures and NO_x/SO_x content [28]

| Вид микроводорослей Microalgal Species | CO ₂ (%) | Температура Temperature (°C) | NO _x / SO _x (мг/л / mg/L) | Продуктивность биомассы (мг/л·сутки) Biomass Productivity (mg/L·day) | CO ₂ потребление (мг/л·сутки) / CO ₂ uptake (mg/L·day) |
|---|------------------------|------------------------------------|--|---|--|
| <i>Nannochloris</i> sp. | 15 | 25 | 0/50 | 350 | 658 |
| <i>Nannochloropsis</i> sp. | 15 | 25 | 0/50 | 300 | 564 |
| <i>Chlorella</i> sp. | 50 | 35 | 60/20 | 950 | 1790 |
| <i>Chlorella</i> sp. | 20 | 40 | – | 700 | 1316 |
| <i>Chlorella</i> sp. | 50 | 25 | – | 386 | 725 |
| <i>Chlorella</i> sp. | 15 | 25 | 0/60 | 1000 | 1880 |
| <i>Chlorella</i> sp. | 50 | 25 | – | 500 | 940 |
| <i>Chlorogleopsis</i> sp. | 5 | 50 | – | 40 | 20,45 |
| <i>Chlorococcum littorale</i> | 50 | 22 | – | 44 | 82 |

Одним из ключевых способов снижения ресурсо- и энергоёмкости производства биотоплива из микроводорослей является культивирование биомассы в морской воде или на сточных водах. Также в различных научных исследованиях и экспериментальной практике в области биотехнологии и производства биотоплива предлагаются следующие подходы:

1) получение этанола из углеводной (крахмалсодержащей) фракции биомассы микроводорослей после экстракции липидов;

2) использование глицерина – побочного продукта производства биодизеля, и остаточной биомассы микроводорослей;

3) рециркуляция воды после сбора биомассы;

4) предварительная обработка с применением ферментов, направленная на разрушение клеточной стенки, для повышения степени извлечения липидов;

5) корректировка pH с помощью биологических флокулянтов, например, на основе экстрактов семян проса, хлопка или других растений;

6) использование солнечного тепла для сушки биомассы в регионах с высоким уровнем солнечной радиации или как вспомогательный метод.

В работе [36] приведён экономический анализ затрат на производство микроводорослей и фиксацию CO₂. В ходе анализа рассматривался пруд с каналом параметрами 0,2 м³/м² и непрерывной работой с потребляемой мощностью на смешивание 2 Вт/м³. Также предполагалось расходовать энергию на сбор микроводорослей в размере 0,1 кВт/м³. В анализе рассматривалось шесть сценариев от пессимистичного до оптимистичного. Пессимистичный включал затраты на сырьё (CO₂, воду и удобрения), а неоптимизированный процесс требовал 4 кг CO₂/кг с выходом 20 г/м² биомассы в день. Оптимистичный сценарий исключал затраты на сырьё за счёт утилизации дымовых газов и сточных вод, при этом потреблял 2 кг CO₂/кг биомассы и имел максимальный теоретический выход 60 г/м² в сутки. Итоговые производственные затраты составили: 0,86 евро/кг при пессимистичном сценарии, и 0,14 евро/кг – при оптимистичном. Затраты на фиксацию CO₂ в последнем сценарии составили половину от общей стоимости (0,07 евро/кг), при этом фиксация CO₂ не является самым дорогостоящим процессом в культивировании водорослей [18].

Производство биодизельного топлива из водорослей требует широкомасштабной

системы выращивания и сбора биомассы, что на данном этапе развития технологий связано с необходимостью снижения затрат на единицу площади. Однако при этом перспективы масштабирования и дальнейшего снижения себестоимости остаются высокими, особенно при совершенствовании технологий культивирования, сбора и переработки биомассы. В частности, сбор биомассы составляет 20–30 % от общей стоимости её производства, главным образом из-за высоких энергетических затрат на обезвоживание. Тем не менее, данный этап представляет собой значительный потенциал для оптимизации, и его совершенствование может существенно снизить общие затраты. Поэтому на этом направлении особенно актуальны дальнейшие научные исследования и технологические улучшения, направленные на повышение энергоэффективности и снижение себестоимости. В статье [37] представлены результаты энергетической и декарбонизационной оценки биомассы микроводорослей при производстве биодизеля. Как показано в работе [18], использование площади культивирования микроводорослей в 1000 м² при скорости роста 30 г/м²/сут, содержании липидов до 30 % и эффективности процессов сбора, экстракции и переэтерификации 90 % обеспечивает ежегодное получение 11 т биомассы, 3300 кг биодизеля и фиксацию 7 т CO₂. Таким образом, средняя производительность биотоплива составляет 3,3 кг/м²/год, а соответствующая нетто-фиксация CO₂ – 7 кг/м²/год.

Будучи экологически чистым топливом, биодизель, получаемый из растительных масел и животных жиров, идеально вписывается в стратегию развития возобновляемой энергетики и всё чаще интегрируется в национальные энергетические стратегии. По данным BCC Research, ожидается, что мировой рынок биодизеля вырастет с \$ 43,1 млрд в 2023 г. до \$ 51,6 млрд к концу 2028 г. при совокупном годовом темпе роста 3,7 % с 2023 по 2028 гг.

В Российской Федерации компания ПАО «ЛУКОЙЛ» ведёт разработки технологий утилизации CO₂ с применением микроводорослей и последующей переработкой биомассы в компоненты биотоплива на территории России. При этом ПАО «ЛУКОЙЛ» рассматривает возможности масштабирования производства низкоуглеродного топлива. Сейчас проект находится на стадии научно-исследовательских работ. Чтобы не платить штрафы за выбросы парниковых газов, у компаний появляется возможность – продажа или покупка угле-

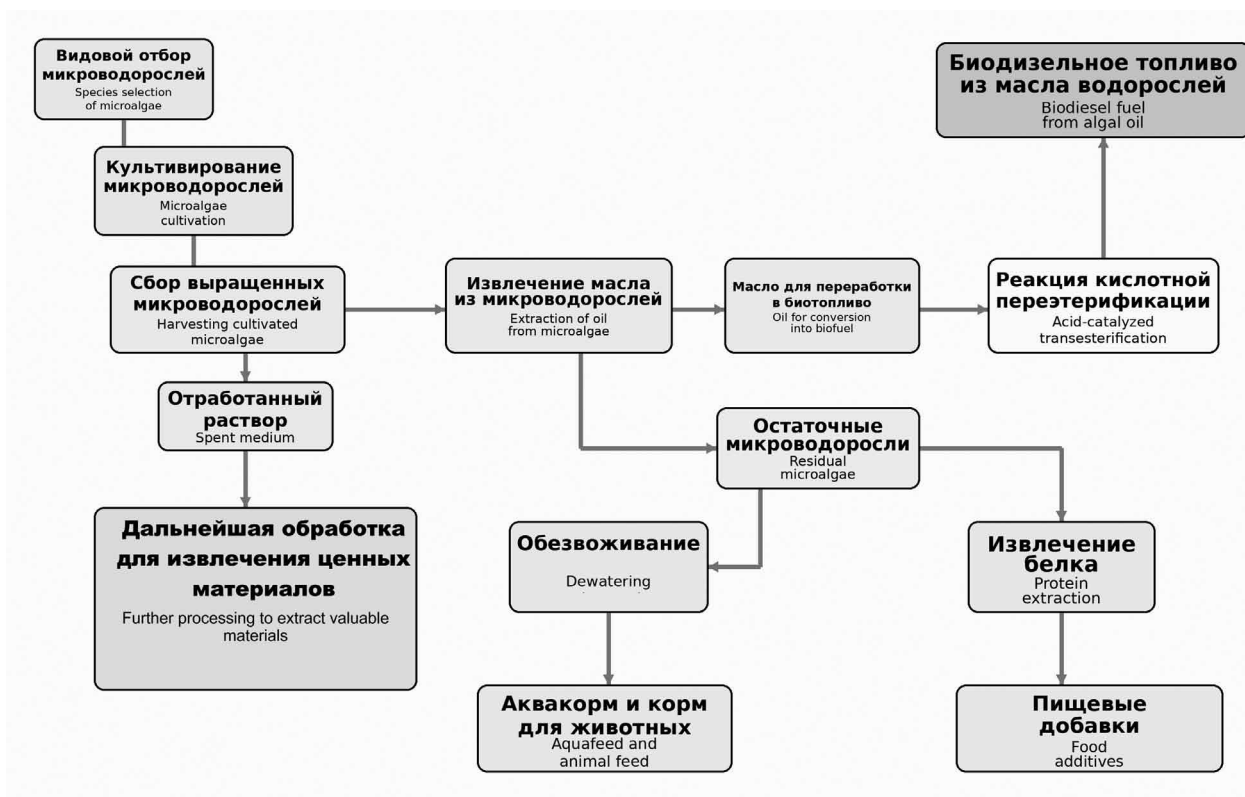


Рис. Технологическая схема производства биодизеля из *Chlorella vulgaris*
 Fig. Technological scheme of biodiesel production from *Chlorella vulgaris*

родных кредитов [38]. Проведены и анонсированы результаты разработки технологии улавливания и переработки CO₂ из дымовых газов с помощью микроводоросли *Chlorella*. Выделение 1 т/час CO₂ (24 т/сутки) компенсируется водоёмом площадью 2,3–9,0 га в зависимости от климатической зоны, а из полученной биомассы возможно получение биодизеля. На рисунке показана технологическая схема производства биодизеля из *Chlorella vulgaris*.

В таблице 4 представлена сравнительная оценка рентабельности установки по производству биодизеля из масла *C. vulgaris* в зависимости от производительности [36].

Таким образом, результаты из таблицы 4 показывают, что проект, который производит 1 т биодизельного топлива в день, является экономически жизнеспособным (за исключением варианта 1, где возникают убытки). Если мощность завода увеличивается, прибыль в один день также будет увеличиваться, даже если цена на биодизельное топливо остаётся на низком уровне в 45 рублей/т. Плантации микроводорослей *C. vulgaris* используются в системах биологической очистки сточных вод (альгофилтрации), где они одновременно очищают воду и накапливают биомассу для производства биодизеля.

Биодизельное топливо, полученное из липидов биомассы микроводорослей р. *Chlorella*, считается экономически целесообразным при культивировании водорослей в больших масштабах. Во многих странах, где существуют плантации микроводорослей, добываемое масло из них более экономично в использовании по сравнению с биодизельным топливом. В то же время при использовании микроводорослей *C. vulgaris* для очистки дымовых газов в гидрофилтрах целесообразно использованную биомассу отправлять на дальнейшую переработку, когда производимое масло может быть получено в больших количествах.

Заключение

Проведённый обзор публикаций (2008–2024 гг.) показывает, что использование микроводорослей для биологической фиксации CO₂ из дымовых газов в контексте технологий улавливания, использования и хранения углерода представляет собой перспективное направление, позволяющее одновременно снижать антропогенную нагрузку и формировать поток биомассы микроводорослей как сырья для получения биотоплива. Данные обзора подтверждают, что применение дымовых

Таблица 4 / Table 4

Оценка рентабельности установки по производству биодизеля из масла *Chlorella vulgaris*
 Profitability assessment of a biodiesel production plant from *Chlorella vulgaris* oil [36]

| Процесс / Process | Единица измерения Unit of measurement | Ориентировочная стоимость, без НДС, руб. Approximate cost, excluding VAT, rub. | | |
|---|---|---|-----------------------|-----------------------|
| | | Вариант 1 Option 1 | Вариант 2 Option 2 | Вариант 3 Option 3 |
| Масло <i>C. vulgaris</i> <i>C. vulgaris</i> oil | литр / liter | 100 | 80 | 60 |
| Метанол / Methanol | литр / liter | 20 | 22 | 25 |
| Затраты на производство Production costs | неделя / week | 8000 | 8000 | 35000 |
| Аренда / Rent | месяц / month | 5000 | 5000 | 5000 |
| Страховка Insurance | год / year | 100000 | 100000 | 100000 |
| Процентная ставка Interest rate | % | 12 | 12 | 12 |
| Биодизельная установка Biodiesel plant | тонна / ton | 1500000 | 1500000 | 1500000 |
| Катализатор Catalyst | за литр / per liter | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Налог на биодизель Biodiesel tax | за литр / per liter | 9,18 | 9,18 | 9,18 |
| НДС / VAT | % | 20 | 20 | 20 |
| Вода / Water | за литр / per liter | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Электроэнергия Electricity | за кВт/час / per kWh | 6,5 | 6,5 | 6,5 |
| Накладные расходы Overhead costs | за год / per year | 500000 | 500000 | 500000 |
| Накладные расходы Overhead costs | за литр биодизеля per liter of biodiesel | 2,5 | 2,5 | 2,5 |
| Затраты на производство Production costs | за литр биодизеля per liter of biodiesel | 2,0 | 1,8 | 5,4 |
| Затраты на воду Water costs | за литр биодизеля per liter of biodiesel | 1,5 | 1,5 | 1,0 |
| Затраты на электроэнергию Electricity costs | за литр биодизеля per liter of biodiesel | 1,5 | 1,5 | 0,9 |
| Предполагаемая стоимость биодизеля Estimated cost of biodiesel | за литр / per liter | 184 | 50 | 45 |

газов как источника CO₂ повышает потенциал поглощения данного газа по сравнению с поглощением атмосферного CO₂, а быстрорастущая биомасса микроводорослей, способная накапливать липиды, может рассматриваться как ресурс для производства биодизельного топлива.

Анализ мирового опыта показывает, что результативность данного подхода опреде-

ляется параметрами культивирования (концентрация подаваемого CO₂, освещённость, температурный режим и поддержание условий, предотвращающих стресс и снижение эффективности фотосинтеза), а также устойчивостью выбранных штаммов в реальных газо- и гидрохимических условиях.

Получение биодизельного топлива из микроводорослей технологически реали-

зуюмо при формировании устойчивой производственной цепочки. Однако технико-экономическая реализуемость в существенной степени лимитируется энергоёмкостью стадий сбора и обезвоживания, которые выступают ключевым резервом оптимизации при масштабировании.

Таким образом, обобщённые результаты обзора подтверждают высокий потенциал микроводорослей как элемента низкоуглеродных ресурсосберегающих технологий, переводящих CO₂ из состава дымовых выбросов в биомассу и продукты с добавленной стоимостью, включая биодизельное топливо. Практическая реализация таких технологий требует комплексного инженерного проектирования систем культивирования и газожидкостного контакта с акцентом на управляемость условий процесса и оптимизацию наиболее ресурсозатратных стадий. Именно масштабирование и технологическое совершенствование являются ключевыми условиями достижения экологического и экономического эффекта.

Работы выполнялись при поддержке РНФ № 24-17-20004 от 12.04.2024 по теме: «Разработка технологий улавливания CO₂ из отработанных дымовых газов энергетических и промышленных установок биомассой микроводорослей».

References

1. Zhang X. Microalgae removal of CO₂ from flue gas. London: IEA Clean Coal Centre, 2015. 95 p. doi: 10.13140/RG.2.2.26617.77929
2. Volkova M.V., Klimov K.K., Lyubomudrov B.E., Sarapulova A.S., Velkin V.I. Development of the concept of environmentally friendly CHP and TPP with active use of photosynthetic processes // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2020. No. 25–27. P. 184–192 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2020.09.017
3. Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Politaeva N.A., Chusov A.N. Development of a technological scheme for carbon dioxide utilization and biohydrogen production using microalgae // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024. No. 10. P. 154–166 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2024.10.154-166
4. Velmozhina K.A., Shinkevich P.S., Politaeva N.A., Mikheev P.Yu. Development of a technological scheme for the utilization of carbon dioxide and the production of biohydrogen using microalgae // *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024. No. 5. P. 24–29 (in Russian). doi: 10.15518/isjaee.2024.05.024-029
5. Shinkevich P.S., Velmozhina K.A., Zibarev N.V., Politaeva N.A., Oparina A.M. Economic justification for the use of microalgae to reduce the impact of carbon dioxide //

Aktualnaja biotehnologija. 2024. No. 2. P. 19–22 (in Russian). doi: 10.20914/2304-4691-2024-2-19-22

6. Zibarev N.V., Politaeva N.A., Molodkina L.M. Production of biodiesel from microalgae by transesterification of biomass // *Butlerov Communications*. 2023. V. 73. No. 1. P. 101–108 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-73-1-101

7. Lukyanov V.A., Gorbunova S.Yu., Gribovskaya I.V. Comparative evaluation of biochemical composition of microalgae biomass *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus obliquus* // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 216–221 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-216-221

8. Nigam P.S., Singh A. Production of liquid biofuels from renewable resources // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. V. 37. No. 1. P. 52–68. doi: 10.1016/j.pecs.2010.01.003

9. Carels N. The challenge of bioenergies: an overview // *Biofuel's Engineering Process Technology* / Ed. M.A. dos Santos Bernardes. IntechOpen, 2011. P. 23–64. doi: 10.5772/16403

10. Khan M.I., Shin J.H., Kim J.D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products // *Microb. Cell Fact.* 2018. V. 17. No. 1. Article No. 36. doi: 10.1186/s12934-018-0879-x

11. Lardon L., Hélias A., Sialve B., Steyer J.-P., Bernard O. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae // *Environ. Sci. Technol.* 2009. V. 43. No. 17. Article No. 6475–6481. doi: 10.1021/es900705j

12. Demirbas M.F. Biofuels from algae for sustainable development // *Applied Energy*. 2011. V. 88. No. 10. P. 3473–3480. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.01.059

13. Brennan L., Owende P. Biofuels from microalgae – a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. No. 2. P. 557–577. doi: 10.1016/J.RSER.2009.10.009

14. Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. V. 14. No. 1. P. 217–232. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.020

15. Chojnacka K., Marquez-Rocha F.-J. Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae // *Biotechnology*. 2004. V. 3. No. 1. P. 21–34. doi: 10.3923/biotech.2004.21.34

16. Pires J.C.M., Alvim-Ferraz M.C.M., Martins F.G., Simões M. Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: engineering aspects and biorefinery concept // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. V. 16. No. 5. P. 3043–3053. doi: 10.1016/j.rser.2012.02.055

17. Sajjadi B., Chen W.-Y., Raman A.A., Ibrahim S. Microalgae lipid and biomass for bio fuel production: a comprehensive review on lipid enhancement strategies and their effects on fatty acid composition // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. V. 97. P. 200–232. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.050

18. Cuellar-Bermudez S.P., Garcia-Perez J.S., Ritmann B.E., Parra-Saldivar R. Photosynthetic bioenergy utilizing CO₂: an approach on flue gases utilization for third generation biofuels // *Journal of Cleaner Production*. 2015. V. 98. P. 53–65. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.03.034
19. Lavenburg V.M., Rosentrater K.A., Jung S. Extraction methods of oils and phytochemicals from seeds and their environmental and economic impacts // *Processes*. 2021. V. 9. Article No. 1839. doi: 10.3390/pr9101839
20. Politaeva N.A., Zibarev N.V., Ilyin I.V. Method for producing of biodiesel fuel from microalgae *Chlorella kessleri* // Patent RU 2819912 C1. Application: 2023115627, 15.06.2023. Publication date: 28.05.2024 (in Russian).
21. Politaeva N.A., Maslikov V.I., Chusov A.N., Zhazhkov V.V., Velmozhina K.A., Shinkievich P.S. Method of increasing biogas potential of organics wastes // Patent RU 2826145 C1. Application: 2023115629, 15.06.2023. Date of publication: 04.09.2024 (in Russian).
22. Zibarev N.V., Politaeva N.A., Oparina A.M. Re-esterification of microalgae biomass for the production of biodiesel fuel // *Rational use of natural resources and processing of technogenic raw materials: fundamental problems of science, materials science, chemistry, and biotechnology. Collection of reports of the International Scientific Conference, Alushta-Belgorod, June 05–09, 2023. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2023. P. 290–294 (in Russian).*
23. Alam F., Date A., Rasjidin R., Mobin S., Moria H., Baqui A. Biofuel from algae – is it a viable alternative? // *Procedia Engineering*. 2012. V. 49. P. 221–227. doi: 10.1016/j.proeng.2012.10.131
24. Yang H., Xu Z., Fan M., Gupta R., Slimane R.B., Bland A.E., Wright I. Progress in carbon dioxide separation and capture: a review // *J. Environ. Sci. (China)*. 2008. V. 20. No. 1. P. 14–27. doi: 10.1016/S1001-0742(08)60002-9
25. Yang J., Xu M., Zhang X., Hu Q., Sommerfeld M., Chen Y. Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: water footprint and nutrients balance // *Bioresour. Technol.* 2011. V. 102. No. 1. P. 159–165. doi: 10.1016/j.biortech.2010.07.017
26. Patil P.D., Dandamudi K.P.R., Wang J., Deng Q., Deng S. Extraction of bio-oils from algae with super critical carbon dioxide and co-solvents // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018. V. 135. P. 60–68. doi: 10.1016/j.supflu.2017.12.019
27. Kuo C.-M., Sun Y.-L., Lin C.-H., Lin C.-H., Wu H.-T., Lin C.-S. Cultivation and biorefinery of microalgae (*Chlorella* sp.) for producing biofuels and other byproducts: a review // *Sustainability*. 2021. V. 13 (23). Article No. 13480. doi: 10.3390/su132313480
28. Ho S.-H., Chen C.-Y., Lee D.-J., Chang J.-S. Perspectives on microalgal CO₂ – emission mitigation systems: a review // *Biotechnol. Adv.* 2011. V. 29. No. 2. P. 189–198. doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.11.001
29. Acién Fernández F.G., González-López C.V., Fernández Sevilla J.M., Molina Grima E. Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal? // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2012. V. 96. P. 577–586. doi: 10.1007/s00253-012-4362-z
30. Pulz O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2001. V. 57. No. 3. P. 287–293. doi: 10.1007/s002530100702
31. Moe T. Carbon dioxide sequestering using microalgal systems. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2002. 32 p. doi: 10.2172/882000
32. Wang B., Li Y., Wu N., Lan C.Q. CO₂ bio-mitigation using microalgae // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2008. V. 79. No. 5. P. 707–718. doi: 10.1007/s00253-008-1518-y
33. Bilanovic D., Andargatchew A., Kroeger T.J., Shellef G. Freshwater and marine microalgae sequestering of CO₂ at different C and N concentrations – response surface methodology analysis // *Energy Conversion and Management*. 2009. V. 50. No. 2. P. 262–267. doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.024
34. Jin X., Gong S., Chen Z., Xia J., Xiang W. Potential microalgal strains for converting flue gas CO₂ into biomass // *J. Appl. Phycol.* 2021. V. 33. P. 47–55. doi: 10.1007/s10811-020-02147-8
35. Maeda K., Owada M., Kimura N., Omata K., Karube I. CO₂ fixation from the flue gas on coal-fired thermal power plant by microalgae // *Energy Convers. Manag.* 1995. V. 36. No. 6–9. P. 717–720. doi: 10.1016/0196-8904(95)00105-m
36. Acién F.G., Fernández J.M., Magán J.J., Molina E. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it // *Biotechnol. Adv.* 2012. V. 30. No. 6. P. 1344–1353. doi: 10.1016/j.biotechadv.2012.02.005
37. Zeng X., Danquah M.K., Chen X.D., Lu Y. Microalgae bioengineering: from CO₂ fixation to biofuel production // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. V. 15. No. 6. P. 3252–3260. doi: 10.1016/j.rser.2011.04.014
38. LUKOIL is working on technologies for the utilization of carbon dioxide and the production of low-carbon fuel [Internet resource] <https://neftegaz.ru/news/ecology/813915-lukoil-rabotaet-nad-tekhnologiyami-utilizatsii-uglerodnogo-gaza-i-proizvodstva-nizkouglerodnogo-topl/?ysclid=m3fslswxic266387888> (Accessed: 13.11.2024).

Переработка попутного нефтяного газа в метанол: экологические последствия факельного сжигания и перспективы низкоуглеродной энергетики (обзор)

© 2026. А. М. Кузьмин^{1,2}, к. т. н.,

начальник учебно-методического управления, ген. директор,

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,

²ООО «ВТР»,

192029, Россия, г. Санкт-Петербург,

пр. Обуховской Обороны, д. 76 литера Р, помещ. 8н,

e-mail: kuzmin.lex@gmail.com, i@kuzminam.ru

В настоящем обзоре систематизированы данные о процессах получения синтез-газа из попутного нефтяного газа (паровой риформинг, некаталитическое парциальное окисление, углекислотная конверсия, автотермический риформинг). Особое внимание уделено малотоннажным установкам на основе некаталитического парциального окисления с использованием принципов жидкостных ракетных двигателей, позволяющих получать синтез-газ при давлениях до 8 МПа. Рассмотрены разработанные автором устройства (патенты RU 183401 U1, RU 176510 U1) для генерации синтез-газа и трёхреакторного каскада синтеза метанола. Показано, что оптимизация состава водородсодержащего газа по модулю $M = 2,0-2,3$ повышает выход метанола на 8–12 %. Проанализированы экономические показатели малотоннажного производства и концепция «метанольной экономики» с замкнутым циклом «метанол–водород». Предложена схема энергетической интеграции с турбогенератором для утилизации тепла отходящих газов, повышающая общий коэффициент полезного действия комплекса до 68 %. Выявлены ключевые нерешённые проблемы: подавление сажеобразования, влияние серосодержащих примесей, разработка компактных систем сепарации и применение методов искусственного интеллекта для оптимизации процессов. Обзор демонстрирует высокий потенциал технологий малотоннажного производства метанола из попутного нефтяного газа для решения экологических и ресурсных проблем нефтегазовой отрасли, как в России, так и в других странах.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ, факельное сжигание, метанол, синтез-газ, парциальное окисление, малотоннажные установки, низкоуглеродная энергетика, метанольная экономика, энергоэффективность.

Associated petroleum gas processing into methanol: environmental impacts of flaring and prospects for low-carbon energy: a review

© 2026. А. М. Кузьмин^{1,2} ORCID: 0000-0003-0153-5683*

¹National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenina Prospect, Tomsk, Russia, 634050,

²LLC “HTR”,

76, lit. R, premises 8n, Obukhovskoy Oborony Prospect,
Saint Petersburg, Russia, 192029,

e-mail: kuzmin.lex@gmail.com, i@kuzminam.ru

This review systematizes data on synthesis gas processing from associated petroleum gas (steam methane reforming, non-catalytic partial oxidation, dry reforming, autothermal reforming). Particular attention is paid to small-scale plants based on non-catalytic partial oxidation using principles of liquid rocket engines, which allow producing syngas at pressures up to 8 MPa. The devices developed by the author (RF patents RU 183401 U1, RU 176510 U1) for syngas generation as well as a three-reactor methanol synthesis cascade are considered. It is shown that optimizing the composition of hydrogen-containing gas to a module $M = 2.0-2.3$ increases methanol yield by 8–12 %. The economic indicators of small-scale production and the concept of a “methanol economy” with a closed “methanol–hydrogen” cycle are analyzed. An energy integration scheme with a turbogenerator for utilizing waste gas heat, increasing the overall efficiency of the complex to 68 %, is proposed. Key unresolved problems are identified: soot suppression under high-pressure conditions,

sulfur-containing impurities effect, compact separation systems development, and the application of artificial intelligence methods for process optimization. The review demonstrates the high potential of small-scale methanol production technologies from associated petroleum gas for solving environmental and resource problems in the oil and gas industry, both in Russia and other countries.

Keywords: associated petroleum gas, flaring, methanol, synthesis gas, partial oxidation, small-scale plants, low-carbon energy, methanol economy, energy efficiency.

Проблема утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) на протяжении десятилетий остаётся одной из наиболее острых для мировой нефтегазовой отрасли. Исторически ПНГ рассматривался как побочный продукт, не обладающий достаточной экономической ценностью для масштабной утилизации, особенно в условиях удалённых и малодобитных месторождений. Это привело к тому, что значительные объёмы ценного углеводородного сырья сжигаются на факелах непосредственно на промыслах. Согласно ежегодному отчёту Всемирного банка «Global Gas Flaring Tracker Report», ситуация продолжает ухудшаться. В 2024 г. мировой объём факельного сжигания достиг 151 млрд м³, что является максимальным показателем с 2007 г. и примерно соответствует годовому потреблению газа всем Африканским континентом [1]. Суммарные выбросы парниковых газов от этой деятельности оцениваются в 389 млн т CO₂-эквивалента. Критически важно, что 46 млн т приходится на несгоревший метан, который в 20-летней перспективе обладает потенциалом глобального потепления (GWP), в 80 раз превышающим таковой для углекислого газа [1, 2].

Факельное сжигание ПНГ оказывает комплексное негативное воздействие на все компоненты окружающей среды, такое как прямой выброс парниковых газов и неполное сгорание, что приводит к эмиссии сажи, оксидов азота, серы, высокотоксичных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [3, 4]. Исследования в районах интенсивной нефтедобычи, например в Нигерии и Западной Сибири, фиксируют повышенное содержание тяжёлых металлов (ТМ) (Pb, Cd, Ni) и ПАУ в почвенном покрове на расстоянии до нескольких километров от факельных установок, что создаёт долгосрочные риски для экосистем и здоровья населения [5, 6].

Для решения этой проблемы Всемирный банк совместно с ООН в 2015 г. инициировал программу «Нулевое рутинное факельное сжигание к 2030 году» (Zero Routine Flaring by 2030) [7]. К 2025 г. к этой инициативе присоединились 109 правительств, нефтяных компаний и институтов развития. На данный момент для достижения цели к 2030 г. про-

гресс остаётся недостаточным и требуется почти 40 % ежегодное сокращение объёмов сжигания [1]. Таким образом, это подчёркивает необходимость разработки и внедрения экономически эффективных технологий утилизации ПНГ, в частности для удалённых и малодобитных месторождений, где подключение к газотранспортной системе или строительство крупных перерабатывающих мощностей нерентабельны.

Наиболее перспективным направлением в этом контексте является малотоннажная газохимия – переработка ПНГ непосредственно на промыслах в жидкие продукты (GTL – Gas-to-Liquids). Ключевым продуктом здесь выступает метанол, мировой рынок которого превышает 180 млн т/год. Метанол широко используется как ингибитор гидратообразования (потребность российских нефтегазовых компаний – более 500 тыс. т/год), компонент моторного топлива, сырьё для производства формальдегида, уксусной кислоты, метилтрет-бутилового эфира (МТБЭ) и олефинов [8, 9]. Транспортировка метанола на удалённые месторождения может увеличивать его стоимость в 2–5 раз [10], что создаёт мощный экономический стимул для организации локального производства.

Ключевой и наиболее капиталоемкой стадией (до 60–70 % затрат) производства метанола является получение синтез-газа – смеси H₂ и CO в определённом соотношении [11, 12]. Существующие методы окислительной конверсии метана имеют свои преимущества и недостатки, и их применимость для малотоннажных установок требует тщательного анализа. Технология некаталитического парциального окисления (ПОК) с использованием воздуха в качестве окислителя рассматривается как наиболее адаптированная к жёстким условиям промыслов: она экзотермична, не требует катализаторов и дорогостоящих кислородных станций, а также позволяет создавать компактное высокопроизводительное оборудование [13, 14].

Цель настоящей работы – систематизировать современные научные данные о технологиях получения синтез-газа и каталитического синтеза метанола из ПНГ, проанализировать

экологические последствия факельного сжигания, а также оценить потенциал и перспективы развития малотоннажных установок как элемента низкоуглеродной энергетики и решения проблемы эмиссий парниковых газов, с учётом специфики российских месторождений и возможностей масштабирования технологии для применения в других странах.

Материалы и методы исследования

Настоящая работа представляет собой научно-аналитический обзор, базирующийся на систематическом поиске и критическом анализе научной литературы, патентной документации и открытых статистических данных. Поиск источников проводился в базах данных Scopus, Web of Science, eLIBRARY.RU, Springer.com, а также в патентных базах ФИПС за период 2010–2025 гг. Использовались следующие ключевые слова и их комбинации: «associated petroleum gas flaring environmental impact», «syngas generation technologies», «methanol synthesis catalysis», «partial oxidation methane», «dry reforming CO», «small-scale GTL», «methanol economy», «matrix methanol conversion hydrogen», «energy integration turboexpander». Глубина поиска и анализа охватывает наиболее значимые и цитируемые работы, а также публикации последних лет, отражающие современное состояние исследований. Дополнительно в обзоре использованы результаты собственных экспериментальных и расчётных исследований, защищённые патентами РФ (RU 183401 U1, RU 176510 U1). Описание экспериментальных установок и методик моделирования, на которых базируются эти результаты, подробно изложено в ранее опубликованных работах [15–17]. В частности, для термодинамического моделирования процесса ПОК использовался программный комплекс TermoCom, основанный на методологии академика В.П. Глушко, верификация полученных результатов проводилась путём сопоставления с расчётами в среде Aspen Hysys. Экспериментальные исследования процесса некаталитического ПОК выполнялись на опытно-демонстрационной установке ОДУ-300, а синтез метанола – на лабораторном стенде ОИВТ РАН. Методики этих исследований подробно описаны в работах [16, 17].

Обработка найденной информации включала сравнительный анализ данных, выявление консенсусных положений и дискуссионных аспектов в исследуемой области.

Статистические данные по объёмам факельного сжигания и эмиссиям парниковых газов приведены по отчёту Всемирного банка «Global Gas Flaring Tracker Report 2025» [1]. Экономические показатели производства метанола основаны на анализе открытых технико-экономических исследований, опубликованных в 2023–2025 гг.

Экологические последствия факельного сжигания попутного нефтяного газа. Эмиссии парниковых газов и вклад в изменение климата

Факельное сжигание ПНГ является одним из крупнейших точечных источников антропогенных выбросов в нефтегазовом секторе. Эффективность сгорания метана в факелах варьируется от 92 до 98 % в зависимости от конструкции, скорости ветра и состава газа, что означает, что от 2 до 8 % метана попадает в атмосферу несгоревшим [18]. С учётом того, что метан имеет $GWP_{100} = 28–36$, а в 20-летней перспективе его воздействие на климат в 80–84 раза сильнее, чем у CO_2 [2], эмиссии несгоревшего метана становятся критическим фактором для достижения краткосрочных климатических целей. Интенсивность факельного сжигания (объём газа на баррель добытой нефти) остаётся практически неизменной последние 15 лет, причём пять стран-лидеров (Россия, Иран, Ирак, США, Венесуэла) обеспечивают 76 % всего мирового сжигания [1]. Это указывает на недостаточные инвестиции в инфраструктуру утилизации ПНГ и слабость регуляторных механизмов. Напротив, страны с более жёстким регулированием и экономическими стимулами (Норвегия, Саудовская Аравия, Канада) демонстрируют интенсивность факельного сжигания на порядок ниже [14].

Неполное сгорание метана и высших углеводородов в факелах приводит к образованию сажи (элементарного углерода), оксида углерода (СО), летучих органических соединений (ЛОС) и ПАУ. Концентрация сажи в выбросах факелов составляет 0,5–5 г/м³ в зависимости от соотношения горючее/воздух, температуры пламени и состава ПНГ [19]. Сажа не только является переносчиком токсичных ПАУ, но и, осаждаясь на снежный и ледовый покров в арктических регионах, снижает альбедо поверхности, ускоряя таяние вечной мерзлоты [20]. Кроме того, сажа выступает переносчиком ПАУ – высокотоксичных соединений с доказанным канцерогенным, мутагенным и тератогенным действием.

Исследования приземных концентраций загрязнителей вблизи факельных установок показали превышение среднесуточных предельно допустимых концентраций (ПДК) по бенз[а]пирену в 5–10 раз на расстоянии до 2 км от источника [4]. В работе [5] изучено распространение продуктов горения от факелов на нефтяных месторождениях Нигерии: установлено, что концентрация ПАУ в почвенном покрове снижается по экспоненциальному закону с расстоянием, достигая фоновых значений на дистанции 3–5 км. Однако в зоне непосредственного воздействия (менее 500 м) содержание бенз[а]пирена в почве превышало допустимые уровни в 15–20 раз, что создаёт риски для населённых пунктов и сельскохозяйственных земель.

Осаждение продуктов факельного сжигания на почвенный покров вызывает накопление ТМ (Pb, Cd, Ni, V, Zn), поступающих как из сжигаемого ПНГ (микропримеси), так и из коррозии металлических элементов факельной арматуры при высоких температурах. Концентрации ТМ в верхнем горизонте почв (0–10 см) в радиусе 1 км от факелов превышают фоновые значения в 3–7 раз. Свинец и кадмий обладают высокой токсичностью и способностью аккумулироваться в пищевых цепях, создавая риски для здоровья человека и биоразнообразия [21].

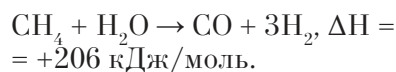
Продукты факельного сжигания попадают в водные объекты через атмосферные осадки, поверхностный сток и прямое загрязнение при авариях. Концентрации ПАУ в поверхностных водах вблизи нефтепромыслов с интенсивным факельным сжиганием в 3–5 раз превышают фоновые значения, ПАУ токсичны для гидробионтов, особенно для планктонных организмов и молоди рыб: уже при концентрациях 5–10 мкг/л наблюдаются нарушения развития эмбрионов и снижение выживаемости. Тяжёлые металлы, поступающие в водоёмы, аккумулируются в донных отложениях и гидробионтах, создавая долгосрочное загрязнение.

Технологии получения синтез-газа из попутного нефтяного газа

Производство метанола включает две основные стадии: получение синтез-газа из углеводородного сырья и последующую каталитическую конверсию синтез-газа в метанол. Процесс получения синтез-газа является определяющим для всей технологической схемы производства метанола. От него

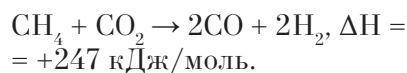
зависят состав и давление газа, поступающего на стадию синтеза, а также энергетическая эффективность и капитальные затраты всего комплекса. Качество синтез-газа оценивается стехиометрическим модулем $M = (H_2 - CO_2) / (CO + CO_2)$. Для оптимальной работы медь-цинк-алюминиевых катализаторов синтеза метанола значение M должно находиться в диапазоне 2,0–2,3, что соответствует соотношению $H_2/CO = 2,2–2,8$ при концентрации $CO_2 = 2–7$ об. % [22, 23].

Паровой риформинг (steam methane reforming, SMR) является доминирующей промышленной технологией получения синтез-газа для производства метанола, аммиака и водорода, особенно в крупнотоннажных производствах. Процесс базируется на эндотермической реакции метана с водяным паром на никелевых катализаторах при температуре 800–900 °С:



Эндотермичность реакции требует значительных энергозатрат на нагрев реакционной смеси, что обеспечивается внешним обогревом трубчатых реакторов. Образующийся синтез-газ имеет высокое соотношение $H_2/CO \geq 4,5$ и модуль $M \geq 2,5$, что превышает оптимум для синтеза метанола. Несмотря на высокую степень конверсии (85–95 %), SMR характеризуется значительными капитальными затратами, большими габаритами оборудования и чувствительностью катализатора к сере, что делает его малоприменимым для мобильных малотоннажных установок в промышленных условиях [24].

Углекислотная конверсия (dry reforming of methane, DRM) привлекает внимание возможностью утилизации двух парниковых газов:



Продуктом является синтез-газ с соотношением $H_2/CO \approx 1$. Технология остаётся на стадии исследований и пилотных проектов из-за сильного сажеобразования (реакция Будуара: $2CO \rightarrow C + CO_2$), приводящей к быстрой дезактивации катализатора, а также высокой эндотермичности процесса [25].

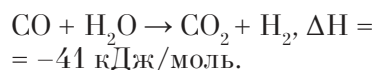
Парциальное окисление (partial oxidation, POX) представляет собой экзотермический процесс, в котором метан взаимодействует

с кислородом (или воздухом) при высоких температурах с образованием синтез-газа. В зависимости от условий процесс может протекать как с применением катализаторов, так и без них. Некаталитический РОХ (также называемый газификацией) реализуют в камерных реакторах при температурах 1200–1500 °С и давлении 2–8 МПа. Отсутствие катализатора исключает проблемы его дезактивации и отравления, что позволяет перерабатывать сырьё с переменным составом, включая ПНГ [26, 27]. Промышленные технологии некаталитического РОХ, разработанные Shell, Texaco и Lurgi, ориентированы на использование чистого кислорода в качестве окислителя. Получаемый при этом синтез-газ характеризуется соотношением $H_2/CO \approx 1,6-1,8$ и стехиометрическим модулем $M \approx 1,4$ [26, 27]. Каталитический РОХ (СРОХ) проводят при более низких температурах (800–1100 °С) на никелевых, родиевых или платиновых катализаторах. Такой подход обеспечивает лучшую селективность и меньшее сажеобразование, однако требует защиты катализатора от серосодержащих примесей и коксообразования [28].

Промежуточное положение занимает автотермический риформинг (ATR), представляющий собой комбинацию РОХ и SMR в одном реакторе. Экзотермическое тепло ПОК используется для поддержания эндотермической реакции парового риформинга, что повышает энергетическую эффективность и позволяет получать синтез-газ с соотношением $H_2/CO = 2,5-3,0$ [29]. Автотермический риформинг широко применяется в крупнотоннажных установках GTL производства метанола, но для малотоннажных систем его использование ограничено высокими капитальными затратами и сложностью конструкции реакторов [29].

Для получения синтез-газа, оптимального для последующего синтеза метанола с требуемым соотношением $H_2/CO = 2,2-2,8$ и $M = 2,0-2,3$, исходный газ после ПОК необходимо корректировать добавлением водяного пара, смешением с потоком газа после парового риформинга или проведением реакции

водяного газа (water-gas shift):



Малотоннажные установки на основе некаталитического парциального окисления: авторские разработки. Для малотоннажных мобильных комплексов мощностью 2,5–10 тыс. т/год, предназначенных для работы непосредственно на удалённых месторождениях, наиболее перспективным является некаталитический РОХ с использованием в качестве окислителя воздуха или обогащённого кислородом воздуха [28, 30]. Применение воздуха исключает необходимость в дорогостоящей и энергоёмкой воздуходелительной установке, что критически важно для автономной работы. Основной недостаток – балластирование синтез-газа азотом (до 40–50 об. %), что снижает эффективное парциальное давление реагентов на стадии синтеза метанола [28].

Автором разработана линейка газогенераторов синтез-газа (ГСГ) (рис.), конструкция которых базируется на принципах жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), адаптированных для целей газохимии [29, 30]. Ключевые особенности ГСГ:

- сверхвысокая теплонапряжённость (до 5 МВт/м³) и, как следствие, малые габариты камеры сгорания; качественное смесеобразование за счёт специальных смесительных головок с центробежными форсунками, что минимизирует образование застойных зон и сажи; охлаждение теплонапряжённых элементов (огневого днища, камеры сгорания) реагентами или деминерализованной водой, обеспечивающее длительный ресурс работы; наличие испарительной камеры, куда впрыскивается вода для «закалки» продуктов реакции, «замораживания» равновесного состава синтез-газа и подавления сажеобразования; модульная конструкция и быстроразъёмные соединения, обеспечивающие высокую ремонтопригодность в полевых условиях.

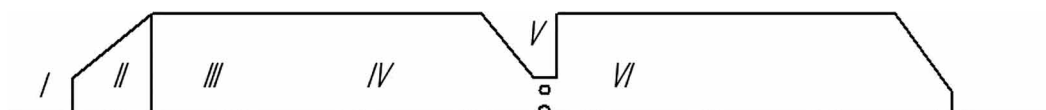


Рис. Принципиальная схема разработанного газогенератора синтез-газа: I – запальное устройство; II – смесительная головка; III–IV – камера сгорания; V – узел впрыска воды; VI – испарительная камера / **Fig.** Schematic diagram of the developed synthesis gas generator (SGG): I – ignition device; II – mixing head; III–IV – combustion chamber; V – water injection unit; VI – evaporation chamber

Термодинамические расчёты для типового состава природного газа (в %: $\text{CH}_4 - 97,57$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 1,0$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 0,37$, $\text{C}_4\text{H}_{10} - 0,15$, $\text{N}_2 - 0,84$, $\text{CO}_2 - 0,07$) и воздуха в качестве окислителя ($\alpha = 0,38$) дают синтез-газ на выходе ГСГ следующего состава (об. %): $\text{H}_2 - 24,3$, $\text{CO} - 14,3$, $\text{CO}_2 - 2,3$, $\text{H}_2\text{O} - 10,7$, $\text{N}_2 - 48,4$, остаточный $\text{CH}_4 -$ менее 0,1. Модуль M для такого газа составляет около 1,4, что значительно ниже оптимального (2,0–2,3). Для его повышения в состав комплекса включён блок коррекции, где за счёт реакции водяного газа ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$) и частичного удаления CO_2 в адсорбере модуль доводится до значения $M = 2,05$. Такая оптимизация позволяет повысить выход метанола на 8–12 % независимо от используемого окислителя [17]. При этом выявлена нелинейная зависимость: при увеличении концентрации O_2 в окислителе свыше 70 % прирост выхода метанола замедляется, что позволяет оптимизировать эксплуатационные затраты.

Ключевая проблема некаталитического РОХ – сажеобразование, особенно при использовании воздуха (недостаток кислорода, низкая температура в зонах гашения пламени) [31]. Для её предотвращения применяют: увлажнение исходного природного газа водяным паром (15–20 масс. %); улучшение смесеобразования за счёт применения форсунок, увеличивающих турбулизацию (перемешивание); впрыск химически очищенной воды в испарительную камеру для быстрого охлаждения продуктов горения до температур ниже порога сажеобразования (< 1000 °С); поддержание коэффициента избытка окислителя в узком диапазоне ($\alpha = 0,34-0,38$ в зависимости от концентрации O_2) [15].

Эксперименты на опытной установке подтвердили возможность работы ГСГ без образования сажевых отложений в камере сгорания и испарительной камере при соблюдении указанных мер [14].

Бескаталитические подходы нового поколения. В последние годы активно исследуются бескаталитические подходы к конверсии метана, основанные на высокотемпературных плазменных, микроволновых и сверхзвуковых технологиях. Параллельно развиваются подходы, использующие ультразвуковую кавитацию и электрохимическую активацию. В работе [32] демонстрируется возможность бескаталитического ПОК метана при комнатной температуре и атмосферном давлении с применением комбинации ультразвукового поля и механического перемешивания. Про-

изводительность подобных систем остаётся на уровне микромолей в час, что далеко от промышленных масштабов. В работе [33] предложено электрохимическое окисление метана на катализаторах IrO_2 с достижением высокой селективности по метанолу при комнатной температуре, однако вопросы долгосрочной стабильности и масштабирования остаются открытыми.

Таким образом, несмотря на высокий потенциал новых методов для фундаментальных исследований и перспективы создания принципиально новых технологий, их текущий уровень технологической готовности не позволяет рассматривать их как альтернативу существующим промышленным решениям для малотоннажной утилизации ПНГ в ближайшие годы.

Метанол как низкоуглеродное сырьё и энергоноситель. Концепция «метанольной экономики»

Джордж Ола предложил концепцию, в которой метанол выступает универсальным химическим сырьём и энергоносителем, способным заменить нефть [9]. Метанол легко транспортируется и хранится при обычных условиях, может использоваться непосредственно как моторное топливо (программы М15/М85 в Китае) или сырьё для производства бензина (MTG-процесс), олефинов (МТО) и водорода [33–35]. С точки зрения углеродного следа, переработка 1000 м³ ПНГ в 500 кг метанола с его последующим использованием позволяет снизить выбросы CO_2 -экв. примерно на 1,3 т по сравнению с прямым факельным сжиганием [36].

Сравнительная оценка экологической эффективности. В таблице 1 представлены результаты расчёта удельных выбросов парниковых газов для различных сценариев утилизации 1000 м³ ПНГ. Данные для факельного сжигания рассчитаны на основе отчёта Всемирного банка [2]. Для генерации электроэнергии принят коэффициент полезного действия (КПД) газопоршневой установки 35 %; оценка выполнена по методике [37]. Показатели для производства метанола рассчитаны автором на основе материальных балансов установки [14, 17]. Сценарий с улавливанием CO_2 оценивался исходя из гипотетической степени улавливания 70 % и данных о потенциале снижения выбросов, представленных в работе [38]. Предлагаемая схема производства метанола с энергетической интеграцией по-

Таблица 1 / Table 1

Сравнение удельных выбросов парниковых газов при различных способах утилизации ПНГ (в расчёте на 1000 м³ газа) / Comparison of specific greenhouse gas emissions for different APG utilization methods (per 1000 m³ of gas)

| Способ утилизации Disposal method | Выбросы CO ₂ -эquiv., т CO ₂ -eq emissions, t | Снижение относительно факела, % / Reduction relative to flaring, % |
|---|--|--|
| Факельное сжигание / Flaring | 2,70 | 0 |
| Генерация электроэнергии (ГПУ) Electricity generation (GPU) | 1,65 | 39 |
| Производство метанола (базовое) Methanol production (baseline) | 0,80 | 70 |
| Производство метанола (с утилизацией) Methanol production (with utilization) | 0,45 | 83 |
| То же + улавливание CO ₂ Same + CO ₂ capture | 0,15 | 94 |

Примечание: пояснения по расчётам см. в тексте.
Note: For calculation explanations, see the text.

Таблица 2 / Table 2

Технико-экономические показатели малотоннажного комплекса производства метанола
Technical and economic indicators of a small-scale methanol production complex

| Показатель / Indicator | Производительность, т/год Production capacity, t/year | |
|---|--|-------|
| | 5000 | 10000 |
| Капитальные затраты (CAPEX), млн руб. Capital expenditures (CAPEX), million RUB | 320 | 540 |
| Операционные затраты (ОРЕХ), млн руб./год Operating expenditures (ОРЕХ), million RUB/year | 135,9 | 208,8 |
| Срок окупаемости (PP), лет / Payback period (PP), years | 1,04 | 0,80 |
| Чистая приведённая стоимость (NPV) за 10 лет при ставке 12 %, млн руб. / Net present value (NPV) over 10 years at 12 % discount rate, million RUB | 1650 | 3550 |
| Внутренняя норма доходности (IRR), % Internal rate of return (IRR), % | 118 | 142 |

Примечание: расчёты выполнены автором для условий удалённого месторождения с использованием ПНГ в качестве сырья. Капитальные затраты включают стоимость оборудования (блоки синтез-газа, синтез метанола, компрессорное оборудование, теплообменники, системы автоматизации), проектирование и пусконаладочные работы. Операционные затраты учитывают расход электроэнергии, фонд оплаты труда, амортизацию, ремонт и обслуживание, прочие расходы.

Note: The author's calculations are based on conditions at a remote field using associated petroleum gas as feedstock. Capital expenditures include equipment costs (syngas units, methanol synthesis units, compressor equipment, heat exchangers, automation systems), design, and commissioning. Operating costs include electricity consumption, labor costs, depreciation, repairs and maintenance, and other expenses.

звояет сократить выбросы CO₂-эquiv. на 83 % по сравнению с факельным сжиганием. Потенциальное улавливание CO₂ из продуктов дожигания (гипотетический сценарий) может повысить этот показатель до 94 %.

Технико-экономические показатели и перспективы внедрения. Расчёт экономической эффективности для условий удалённого месторождения (где ПНГ является побочным продуктом) демонстрирует исключительную привлекательность проекта (табл. 2). Основной вклад в экономику вносит не столько высокая эффективность конверсии, сколько

исключение колоссальных логистических издержек на доставку метанола.

Перспективные направления и нерешённые проблемы

Проведённый анализ позволяет выделить несколько ключевых направлений для дальнейших исследований и разработок.

Подавление сажеобразования в условиях высоких давлений. Некаталитическое ПОК при давлениях 6–8 МПа, необходимых для исключения стадии компримирования

синтез-газа, протекает в условиях повышенной склонности к сажеобразованию по сравнению с атмосферным давлением [31]. Повышение давления сдвигает равновесие реакции Будуара ($2\text{CO} \rightarrow \text{C} + \text{CO}_2$) в сторону образования углерода, а также замедляет диффузию кислорода в зоны, богатые метаном, создавая локальные области с недостатком окислителя [31, 39]. Увлажнение сырья водяным паром снижает сажеобразование благодаря реакции газификации углерода ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$), однако избыточное увлажнение снижает температуру в камере сгорания и ухудшает качество синтез-газа [31]. Оптимизация конструкции смесительных головок ГСГ для обеспечения быстрого и однородного смешения метана и воздуха является ключевой задачей. Применение центробежно-струйных форсунок, вихревых камер предварительного смешения и многосопловых инжекторов обеспечивает время смешения < 1 мс и снижает вероятность образования богатых метаном зон [15, 39]. Дальнейшие исследования требуют CFD-моделирования процессов горения и турбулентного смешения в камере сгорания ГСГ для выявления оптимальной геометрии форсунок и камеры [39].

Защита катализаторов от серосодержащих примесей. Попутный нефтяной газ, в отличие от магистрального природного газа, часто содержит повышенные концентрации сероводорода (H_2S), меркаптанов (RSH) и карбонилсульфида (COS) – от десятков ppm до нескольких процентов в зависимости от месторождения [40]. Серосодержащие соединения являются ядами для медь-цинковых катализаторов синтеза метанола: адсорбируясь на активных центрах меди, они блокируют доступ реагирующих молекул и снижают активность катализатора [41, 42]. Уже при концентрации $\text{H}_2\text{S} > 1$ ppm наблюдается заметное падение активности, а при > 10 ppm катализатор необратимо отравляется в течение нескольких недель [41]. Традиционная очистка синтез-газа от серы включает гидрирование сероорганических соединений на кобальт-молибденовых катализаторах при $300\text{--}400$ °C с последующей адсорбцией H_2S на ZnO-сорбентах [42, 43]. Однако для малотоннажных установок эта схема избыточно сложна. Перспективными являются адсорбенты на основе оксидов железа, цинка и меди, способные эффективно удалять H_2S и COS при температурах синтез-газа $200\text{--}300$ °C без необходимости в отдельной стадии гидрирования [43, 44]. Срок службы таких адсорбентов со-

ставляет 1–2 года при концентрации серы в ПНГ < 100 ppm [43].

Интеграция сверхзвуковых сепараторов для предварительной очистки ПНГ. Попутный нефтяной газ содержит не только серу, но и высшие углеводороды (C_{5+}), водяной пар, CO_2 и механические примеси, которые желательно удалить перед подачей в ГСГ для предотвращения сажеобразования и коррозии оборудования [45]. Традиционные методы сепарации (гравитационные сепараторы, абсорбционная осушка, адсорбционные фильтры) громоздки и требуют периодической регенерации [45]. Сверхзвуковые сепараторы, разработанные компанией Twister BV (Нидерланды), осуществляют охлаждение газа при адиабатическом расширении в сверхзвуковом сопле Лавалья до температур ниже точки росы воды и углеводородов ($-20\text{...}-40$ °C) с последующим улавливанием сконденсированных капель в циклонном сепараторе и нагревом газа в диффузоре [46, 47]. Процесс занимает доли секунды и не требует внешнего подвода энергии (используется энергия давления газа), движущихся частей и химических реагентов [46]. Сверхзвуковые сепараторы компактны (длина 2–3 м, диаметр 0,3–0,5 м), обеспечивают очистку газа от воды на 90–95 %, от C_{5+} на 80–90 % и практически не требуют обслуживания [46, 47]. Внедрение сверхзвуковых сепараторов в малотоннажные установки производства метанола из ПНГ позволит повысить надёжность работы ГСГ и катализаторов, снизить риск сажеобразования и отравления [46].

Применение методов искусственного интеллекта (ИИ) для оптимизации процессов. Процессы конверсии метана в синтез-газ и синтеза метанола характеризуются множеством взаимосвязанных параметров (температура, давление, состав сырья, расход окислителя, активность катализатора), влияющих на выход и качество продукта [48]. Традиционные системы управления на основе ПИД-регуляторов не способны учитывать динамику многофакторных взаимодействий и обеспечивать глобальную оптимизацию [48]. Применение методов машинного обучения (нейронные сети, генетические алгоритмы, нечёткая логика) позволяет создавать адаптивные системы управления, предсказывающие оптимальные режимы работы в реальном времени на основе текущих данных с датчиков [48, 49]. Китайская компания Sinopec внедрила на нескольких установках производства метанола систему интеллектуального управления, основанную на нейронных сетях,

обученных на данных 5-летней эксплуатации [50]. Система обеспечила повышение выхода метанола на 2–3 % и снижение расхода энергии на 5–7 % [50]. Для малотоннажных установок с ограниченным штатом операторов применение ИИ особенно перспективно, поскольку позволяет автоматизировать принятие решений и минимизировать отклонения от оптимального режима [48].

Энергетическая интеграция и утилизация хвостовых газов. Эффективное использование тепловых потоков является ключевым фактором повышения общей энергоэффективности малотоннажных комплексов. Автором предложена схема энергетической интеграции, включающая высокотемпературный теплообменник (котёл-утилизатор) для охлаждения синтез-газа с выхода ГСГ (900 °С – 400 °С) и генерации перегретого водяного пара (400–450 °С, 4–5 МПа); турбодетандер для расширения перегретого пара с выработкой электроэнергии (генератор 100–300 кВт в зависимости от производительности установки); дожигание хвостовых газов (содержащих H_2 , CO, CH_4) в камере сгорания с выработкой дополнительного перегретого пара для турбодетандера; использование выхлопа турбодетандера (пар 120–150 °С) для подогрева сырья и химически очищенной воды, подаваемых в ГСГ [16, 51]. Расчёты показали, что такая схема обеспечивает выработку 150–250 кВт электроэнергии для установки мощностью 5000 т метанола/год, что покрывает 60–80 % собственных нужд установки (компрессоры, насосы, системы управления) и снижает потребность во внешнем электроснабжении. Дожигание хвостовых газов также решает проблему их утилизации и снижает общие эмиссии CO_2 на 10–15 % по сравнению с факельным сжиганием [51].

Заключение

Факельное сжигание ПНГ остаётся серьёзной экологической и ресурсной проблемой мировой нефтегазовой отрасли, приводя к ежегодному выбросу сотен миллионов тонн парниковых газов, загрязнению атмосферы, почв и водных экосистем продуктами неполного сгорания, а также безвозвратной потере ценного углеводородного сырья. Инициатива Всемирного банка «Нулевое рутинное факельное сжигание к 2030 году» определяет стратегическое направление для нефтяных компаний и правительств, однако её реализация требует внедрения экономически эф-

фективных технологий утилизации ПНГ, в первую очередь на малодобитных и удалённых месторождениях. Среди существующих методов наиболее перспективным для таких условий является малотоннажное производство метанола на основе некаталитического парциального окисления. Разработанные автором газогенераторы синтез-газа (патенты RU 183401 U1, RU 176510 U1), использующие принципы жидкостных ракетных двигателей, обеспечивают компактность оборудования, высокую производительность, возможность работы на воздухе в качестве окислителя без кислородных станций, отсутствие катализаторов на стадии получения синтез-газа и высокое давление процесса (6–8 МПа), исключая необходимость в мощных компрессорах. Оптимизация состава синтез-газа по модулю $M = 2,0–2,3$, достигаемая в блоке коррекции, повышает выход метанола на 8–12 % и является ключевым фактором экономической эффективности малотоннажного производства. Предложенная схема повышения энергетической эффективности и интеграции с турбогенератором и дожиганием хвостовых газов позволяет повысить общий КПД комплекса до 70 %, сократить потребление внешней электроэнергии и практически полностью исключить выбросы горючих компонентов, дополнительно снижая углеродный след до 15 % (более чем 80 % относительно факельного сжигания). Техничко-экономический анализ подтверждает высокую инвестиционную привлекательность таких проектов в условиях удалённых месторождений со сроком окупаемости менее 1,5 лет, что делает их реалистичной альтернативой доставке метанола. Метанол, полученный из ПНГ, является не только высоколиквидным химическим продуктом, но и перспективным низкоуглеродным энергоносителем, обеспечивающим основу для «метанольной экономики» и замкнутых циклов «метанол–водород–электроэнергия». Ключевые нерешённые проблемы включают подавление сажеобразования в условиях высоких давлений и недостатка кислорода, защиту катализаторов синтеза метанола от отравления серосодержащими примесями ПНГ, разработку компактных и эффективных систем предварительной очистки газа (сверхзвуковые сепараторы), а также применение методов искусственного интеллекта для адаптивного управления процессами конверсии и синтеза. Решение этих проблем откроет путь к масштабному внедрению малотоннажных установок производства метанола на нефте-

промыслах и существенному сокращению объёмов факельного сжигания ПНГ, что внесёт значимый вклад в достижение глобальных климатических целей и формирование низкоуглеродной энергетики. Представленные решения могут быть адаптированы для применения не только в России, но и в других странах, сталкивающихся с проблемой утилизации ПНГ.

References

1. 2025 Global gas flaring tracker report [Internet resource] <https://www.worldbank.org/en/programs/gasflaringreduction/publication/2025-global-gas-flaring-tracker-report> (Accessed: 06.05.2026).
2. Climate Change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, J.B.R. Matthews, S. Berger, M. Huang, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou, E. Lonnoy, T.K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell, N. Caud. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. 40 p.
3. Strosher M.T. Characterization of emissions from diffusion flare systems // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2000. V. 50. No. 10. P. 1723–1733. doi: 10.1080/10473289.2000.10464218
4. Jindamanee K., Keawboonchu J., Pinthong N., Meeyai A., Inchai P., Thepanondh S. Environmental impacts and emission profiles of volatile organic compounds from petroleum refineries // *Sci. Rep.* 2025. V. 15. No. 1. Article 15509. doi: 10.1038/s41598-025-99932-7
5. Johansen B.E. Nigeria's hell on earth: oil, life, and death in the Niger delta // *Human Environmental Tragedies* / Ed. B.E. Johansen. Cham: Springer, 2025. P. 6–25. doi: 10.1007/978-3-031-96981-2_6
6. Nezhivikh D.A. The effect of associated petroleum gas combustion on the state of the environment // *Naukosfera.* 2022. No. 6-1. P. 1–10 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.6592132
7. Zero Routine Flaring by 2030 (ZRF) Initiative [Internet resource] <https://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030/about> (Accessed: 28.03.2026).
8. Grunvald A.V. Usage methanol in the gas industry as an inhibitor of hydrate formation and forecast of its consumption in the period until 2030 // *Oil & Gas Business.* 2007. No. 2 [Internet resource] https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Grunvald/Grunvald_1.pdf (Accessed: 06.05.2026) (in Russian).
9. Olah G.A., Goepfert A., Prakash G.K.S. Beyond oil and gas: the methanol economy. Weinheim: Wiley-VCH, 2018. 496 p.
10. Kuzmin A.M., Ulmanis A.A., Tceneva S.N., Buslaev G.V., Morin A.A. Technical and economic assessment of low-tonnage methanol production technology under partial oxidation of natural gas by air // *Oil & Gas Business.* 2022. No. 1. P. 144–169 (in Russian). doi: 10.17122/ogbus-2022-1-144-169
11. Gimaeva A.R., Khasanov I.I. Methods of obtaining synthesis gas for methanol production // *Oil & Gas Chemistry.* 2018. No. 1. P. 14–19 (in Russian).
12. Rozovskii A.Ya. Theoretical foundations of the methanol synthesis process. Moskva: Khimiya, 1990. 267 p. (in Russian).
13. Arutyunov V.S., Savchenko V.I., Sedov I.V., Makaryan I.A., Shmelev V.M., Aldoshin S.M. New conceptions for development of small-scale gas chemistry // *Oil & Gas Chemistry.* 2014. No. 4. P. 19–23 (in Russian).
14. Kuzmin A.M. Synthesis gas production units based on hydrocarbon feedstock for low-tonnage methanol production complexes at remote oil and gas fields // *Oil & Gas Business.* 2025. No. 6. P. 331–352 (in Russian). doi: 10.17122/ogbus-2025-6-331-352
15. Kuzmin A.M., Kulakov K.V., Kulakov S.V., Tseneva S.N. Design features of syngas gas generators for low-tonnage methanol production // *Oil & Gas Business.* 2021. No. 3. P. 124–146 (in Russian). doi: 10.17122/ogbus-2021-3-124-146
16. Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Kuzmin A.M. Foundations of design of three-component gas generator of synthesis gas // *Oil & Gas Chemistry.* 2017. No. 4. P. 9–16 (in Russian).
17. Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M. Influence of hydrogen-containing gas composition on methanol yield // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2020. V. 331. No. 10. P. 187–195 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2020/10/2871
18. Leahy D.M., Preston K., Strosher M. Theoretical and observational assessments of flare efficiencies // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2001. V. 51. No. 12. P. 1610–1616. doi: 10.1080/10473289.2001.10464390
19. McEwen J.D.N., Johnson M.R. Black carbon particulate matter emission factors for buoyancy-driven associated gas flares // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2012. V. 62. No. 3. P. 307–321. doi: 10.1080/10473289.2011.650040
20. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment // *J. Geophys. Res. D: Atmos.* 2013. V. 118. No. 11. P. 5380–5552. doi: 10.1002/jgrd.50171
21. Tchounwou P.B., Yedjou C.G., Patlolla A.K., Sutton D.J. Heavy metal toxicity and the environment // *Exp. Suppl.* 2012. V. 101. P. 133–164. doi: 10.1007/978-3-7643-8340-4_6
22. Karavaev M.M., Leonov V.E., Popov I.G., Shepelev E.T. Technology of synthetic methanol. Moskva: Khimiya, 1984. 240 p. (in Russian).
23. Dybkjaer I., Christensen T.S. Syngas for large scale conversion of natural gas to liquid fuels // *Stud. Surf. Sci. Catal.* 2001. V. 136. P. 435–440. doi: 10.1016/S0167-2991(01)80333-7
24. Rostrup-Nielsen J., Sehested J., Noerskov J.K. Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO₂ refor-

- ming // Adv. Catal. 2002. V. 47. P. 65–139. doi: 10.1016/S0360-0564(02)47006-X
25. Pakhare D., Spivey J. A review of dry (CO₂) reforming of methane over noble metal catalysts // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. No. 22. P. 7813–7837. doi: 10.1039/c3cs60395d
26. Arutyunov V.S. Promising technologies based on partial oxidation of hydrocarbon gases // Gazokhimiya. 2009. No. 6. P. 50–61 (in Russian).
27. Lutz A.E., Bradshaw R.W., Bromberg L., Rabinovich A. Thermodynamic analysis of hydrogen production by partial oxidation reforming // Int. J. Hydrogen Energy. 2004. V. 29. No. 8. P. 809–816. doi: 10.1016/j.ijhydene.2003.09.015
28. York A.P.E., Xiao T., Green M.L.H. Brief overview of the partial oxidation of methane to synthesis gas // Top. Catal. 2003. V. 22. P. 345–358. doi: 10.1023/A:1023552709642
29. Hydrogen and syngas production and purification technologies / Eds. K. Liu, C. Song, V. Subramani. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 560 p.
30. Arutyunov V.S., Savchenko V.I., Sedov I.V. Prospects of field gas chemical technologies using nitrogen-diluted syngas // Oil & Gas Chemistry. 2016. No. 4. P. 14–23 (in Russian).
31. Stolyarevskiy A.Ya. Process of production of synthesis gas for hydrogen energy // Alternative Energy and Ecology. 2005. No. 2 (22). P. 26–32 (in Russian).
32. Guo X., Fang G., Li G., Ma H., Fan H., Yu L., Ma C., Wu X., Deng D., Wei M., Tan D., Si R., Zhang S., Li J., Sun L., Tang Z., Pan X., Bao X. Direct, nonoxidative conversion of methane to ethylene, aromatics, and hydrogen // Science. 2014. V. 344. No. 6184. P. 616–619. doi: 10.1126/science.1253150
33. Kim C., Lee J., Lee S., Jung W., Min H., Choi J., Kim S., Kim Y.T., Lee J., Yoo J.S., Moon J.H. High-selectivity room-temperature partial oxidation of methane to methanol enabled by electrochemical oxygen promotion on IrO₂ catalysts // Nat. Catal. 2025. V. 8. P. 688–696. doi: 10.1038/s41929-025-01363-0
34. Bouhental B., Navid A., Eckart S. The role and potential of alternative fuels in driving the energy transition // J. Therm. Anal. Calorim. 2025. V. 150. P. 18007–18042. doi: 10.1007/s10973-025-14790-9
35. Liu C., Li Z., Pei Y., An Y. Methanol as a fuel for internal combustion engines // Engines and fuels for future transport. Energy, environment, and sustainability / Eds. G. Kalghatgi, A.K. Agarwal, F. Leach, K. Senecal. Singapore: Springer, 2022. P. 281–324. doi: 10.1007/978-981-16-8717-4_12
36. Riaz A., Zahedi G., Klemeš J.J. A review of cleaner production methods for the manufacture of methanol // J. Cleaner Prod. 2013. V. 57. P. 19–37. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.06.017
37. Onyeabor E. Strategies for atmospheric pollution abatement and control // Environmental law. Cham: Springer, 2024. P. 255–374. doi: 10.1007/978-3-031-68956-7_6
38. Arutyunov V.S., Nikitin A.V., Savchenko V.I., Sedov I.V. Combined production of hydrogen and methanol without CO₂ emission based on matrix conversion of natural gas // Dokl. Chem. 2023. V. 513. P. 361–366. doi: 10.1134/S0012500823601018
39. Lefebvre A.H., Ballal D.R. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions. Boca Raton: CRC Press, 2010. 557 p. doi: 10.1201/9781420086058
40. Kim K.-H., Jahan S.A., Kabir E., Brown R.J.C. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects // Environ. Int. 2013. V. 60. P. 71–80. doi: 10.1016/j.envint.2013.07.019
41. Elvidge C.D., Zhizhin M., Baugh K., Hsu F.C., Ghosh T. Methods for global survey of natural gas flaring from visible infrared imaging radiometer suite data // Energies. 2016. V. 9. No. 1. Article No. 14. doi: 10.3390/en9010014
42. Kavet R., Nauss K.M. The toxicity of inhaled methanol vapors // Crit. Rev. Toxicol. 1990. V. 21. No. 1. P. 21–50. doi: 10.3109/10408449009089872
43. Varol M. Assessment of heavy metal contamination in sediments of the Tigris River (Turkey) using pollution indices and multivariate statistical techniques // J. Hazard. Mater. 2011. V. 195. P. 355–364. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.08.051
44. Trakarnpruk W., Seentrakoon B., Porntangjitlikit S. Hydrodesulfurization of diesel oils by MoS₂ catalyst prepared by *in situ* decomposition of ammonium thiomolybdate // Science, Engineering and Health Studies. 2013. V. 2. No. 1. P. 7–13. doi: 10.14456/sustj.2008.1
45. Zulkefli N.N., Masdar M.S., Wan Isahak W.N.R., Md Jahim J., Md Rejab S.A., Chien Lye C. Removal of hydrogen sulfide from a biogas mimic by using impregnated activated carbon adsorbent // PLoS One. 2019. V. 14. No. 2. P. e0211713. doi: 10.1371/journal.pone.0211713
46. Mokhatab S., Poe W.A., Mak J.Y. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. 4th ed. Waltham: Gulf Professional Publishing, 2018. 1056 p.
47. Cao X., Bian J. Supersonic separation technology for natural gas processing: A review // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. 2019. V. 136. P. 138–151. doi: 10.1016/j.cep.2019.01.007
48. Esmaeili A. Supersonic separation of natural gas liquids by twister technology // Chemical Engineering Transactions. 2016. V. 52. P. 7–12. doi: 10.3303/CET1652002
49. Kokkinos N.C., Emmanouilidou E., Zachopoulos F., Mittas N. Application of artificial intelligence in modeling of methanol production from renewable sources // Comprehensive Methanol Science: Production, Applications, and Emerging Technologies / Ed. M.R. Rahimpour. V. 2. Elsevier, 2025. P. 983–999. doi: 10.1016/B978-0-443-15740-0.00001-X
50. Nuchitprasitchai S., Cremaschi S. An algorithm to determine sample sizes for optimization with artificial neural networks // AIChE J. 2013. V. 59. No. 3. P. 805–812. doi: 10.1002/aic.13871
51. Kuzmin A.M., Buslaev G.V., Morenov V.A., Tse-neva S.N., Gavrilo N.A. Improving the energy efficiency of small-scale methanol production through the use of microturboexpander units // Journal of Mining Institute. 2022. V. 258. P. 1038–1049 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2022.104

Исследование состава водных проб окружающей среды на содержание анионных поверхностно-активных веществ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии

© 2026. А. В. Стрелецкий, к. х. н., с. н. с.,
Д. Б. Каменецкая, к. б. н., с. н. с.,
О. Н. Савостикова, к. мед. н., начальник отдела экотоксикологии и
физико-химических методов исследований,
ФГБУ «ЦСП» ФМБА России,
119121, Россия, г. Москва, ул. Погодинская, д. 10, стр. 1,
e-mail: astreletsky@csfpmba.ru

Представлен целостный подход, применимый в рамках рутинного анализа различных типов вод (питьевая, сточная и очищенная сточная) на предмет содержания анионных поверхностно-активных веществ (АПАВ). Исследование выполнено методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием. Описана комплексная методика анализа, включающая упрощенную пробоподготовку, градиентное хроматографическое разделение и масс-спектрометрическое детектирование в различных режимах, включая тандемную масс-спектрометрию. Для идентификации АПАВ использовались открытые базы масс-спектрометрических данных, содержащие информацию о молекулярных массах аналитов и их специфических фрагментных ионах. Приведён пример оценки количественного содержания загрязняющих веществ в сточных водах до и после очистки на водоочистных сооружениях, что подтверждает эффективность применяемого метода. Результаты хроматографического анализа пробы сточной воды выявили АПАВ – алкилбензолсульфонаты (C10-, C11- и C12-) и алкилсульфаты (C14). После очистки сточной воды концентрация этих веществ значительно снижается: эффективность очистки составила 97–99 %. Обнаружение следовых количеств АПАВ в очищенной воде свидетельствует о необходимости постоянного мониторинга качества воды для оценки степени загрязнения этими веществами.

Ключевые слова: анионные поверхностно-активные вещества, масс-спектрометрия, хроматография, сточные воды.

Study on environmental water samples for anionic surfactants by high-performance liquid chromatography

© 2026. A. V. Streletskiy ORCID: 0000-0002-8194-1536, D. B. Kamenetskaya ORCID: 0000-0002-9050-3757
O. N. Savostikova ORCID: 0000-0002-7032-1366

Federal State Budgetary Institution “Centre for Strategic Planning and Management of Biomedical Health Risks” of the Federal medical and biological agency (Centre for Strategic Planning, of the Federal medical and biological agency),
10, Bld. 1, Pogodinskaya St., Moscow, Russia, 191121,
e-mail: astreletsky@csfpmba.ru

Results of analysis of various water samples (drinking water, wastewater, and treated wastewater) for anionic surfactants content are presented. The study was conducted using high-performance liquid chromatography with mass spectrometric detection. A comprehensive analytical methodology, including simplified sample preparation, gradient chromatographic separation, mass-spectrometric detection in various modes (including tandem mass spectrometry) is described. Special attention is paid to the anionic surfactants identification using open-access mass-spectrometric databases that based on molecular mass and characteristic fragments. An example of assessing the quantitative composition of contaminants in wastewater before and after treatment is given. It demonstrates the effectiveness of the applied approach. The results of the chromatographic analysis of the wastewater sample revealed anionic surfactants – alkylbenzene sulfonates (C10-, C11-, and C12-) and alkylsulfates (C14). After wastewater treatment, the concentration of the above substances significantly decreases; a removal efficiency is 97–99 %. The detection of trace amounts of surfactants in the treated water indicates the need for continuous water quality monitoring to assess the level of contamination by anionic surfactants.

Keywords: anionic surfactants, mass spectrometry, chromatography, wastewater.

Основными источниками загрязнения поверхностно-активными веществами (ПАВ) водных объектов, как правило, выступают сельскохозяйственные и промышленные предприятия, а также хозяйственно-бытовые сточные воды. Вследствие особых свойств ПАВ наносимый ими вред окружающей среде трудно переоценить. Для эффективного мониторинга таких загрязнений важно уметь идентифицировать отдельные примеси и измерять их концентрацию. Идентификация конкретных соединений также необходима для определения источника загрязнения и для более эффективного контроля в повседневной практике.

В настоящей работе рассмотрены анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ), которые являются одними из наиболее распространённых ПАВ [1]. Анионные ПАВ широко используются в моющих и косметических средствах, а также применяются во многих производственно-технологических процессах. Примерами таких соединений являются алкилбензолсульфонаты натрия и алкилсульфонаты натрия.

Поскольку объём бытового и промышленного использования АПАВ достаточно высокий [2], всегда существует вероятность того, что АПАВ могут проникнуть в питьевую воду через очистные сооружения, создавая тем самым угрозу для здоровья населения. Активно проводятся исследовательские работы по совершенствованию и оптимизации процесса очистки вод от разного рода химических загрязнителей, включая синтетические ПАВ [3, 4]. В связи с этим задача по обнаружению и количественному определению АПАВ в водных объектах является актуальной [5, 6].

Нормы допустимых концентраций АПАВ могут варьироваться в зависимости от конкретного соединения, объекта загрязнения и регуляторных стандартов. Для сточных вод максимально допустимое значение концентраций синтетических АПАВ, установленное Постановлением Правительства РФ от 29.07.2013 № 644, составляет 10 мг/л, применительно к сбросу в бытовые системы водоотведения. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 для питьевой воды установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) для отдельных соединений, так, для алкилбензолсульфонатов ПДК зафиксировано на уровне 0,5 мг/л по органолептическому лимитирующему показателю вредности и пенообразованию.

Вместе с тем лабораторный анализ состава АПАВ и продуктов их разложения в водных

объектах окружающей среды может быть затруднён из-за отсутствия необходимой селективности метода при идентификации отдельных соединений и малой чувствительности, которой может быть недостаточно для установления остаточных количеств ПАВ.

Например, для спектрофотометрических методов чувствительность анализа ПАВ может составлять 0,01–1,00 мг/л, в зависимости от конкретного соединения и условий анализа [7, 8]. Потенциометрический метод анализа ПАВ не является трудоёмким, чувствительность данного метода составляет от 0,01 мг/л в зависимости от типа ион-селективного электрода конкретного образца и условий анализа [7, 9]. Перечисленные выше методы дают оценку содержания одного конкретного вида ПАВ (анионного, катионного, неионогенного) в пробе [10–12]. Для селективного анализа, направленного на идентификацию и определение количественного содержания соединений ПАВ в одном образце, следует использовать методы хроматографии с масс-селективным детектированием.

Известно, что метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-селективным детектором (ВЭЖХ-МС) позволяет обнаруживать и анализировать катионные, анионные ПАВ в пищевых продуктах и образцах воды с высокой чувствительностью и селективностью [13]. В многочисленных исследованиях особое внимание уделяется такому этапу анализа, как подготовка проб, например, твёрдофазная экстракция [14], дисперсионная жидкостно-жидкостная микроэкстракция [13], модифицированный способ электрораспылительной ионизации (бумажный [15], с проточной инъекцией [16]).

Цель настоящей работы заключается в проведении исследований по оценке качества очистки сточных вод после прохождения очистных сооружений методом ВЭЖХ-МС с идентификацией наличия примесных АПАВ и определением их количества в различных водных пробах (питьевая вода, сточная вода, сточная вода после очистки, вода из поверхностных водоёмов).

Объекты и методы исследования

Отбор воды проводили в соответствии с ГОСТ Р 59024-2020 и ГОСТ Р 56237-2014 в герметично закрывающиеся стеклянные флаконы. Объём отбираемой пробы составлял 1000 мл. После транспортировки пробы

хранили при температуре (2–10) °С. Отобранную пробу анализировали не позднее 14 сут с момента отбора.

Для анализа водных проб использовали простой и быстрый способ пробоподготовки, заключающийся в очистке от элементов твёрдофазной дисперсией. В процессе подготовки к анализу отобранную пробу первоначально центрифугировали в течение 10 мин при центробежном ускорении 3000 g для удаления крупных частиц. Затем для удаления мельчайших частиц центрифугат пропускали через фильтрующую насадку для шприцев с полиэфирсульфоновой мембраной (диаметр пор 0,22 мкм). Для проведения хроматографического анализа пробу объёмом 1,5 мл переносили в стеклянную виалу объёмом 2 мл. В таблице 1 представлен перечень и описание исследованных проб.

Анализ образцов проведён с использованием жидкостного хромато-масс-спектрометра ВЭЖХ система Agilent 1200 серии с масс-спектрометрическим детектором Agilent 6430 (Agilent Technologies, США). Хроматографию проводили на обращённо-фазовой колонке Zorbax SB-C18 (размер зёрен сорбента – 1,8 мкм, 100 × 2,1 мм) при t = 30 °С в градиентном режиме элюирования (90 % А – > 10 % А в течение 10 мин). Компоненты подвижной фазы: А – 0,1 % (по объёму) водный раствор муравьиной кислоты, Б – ацетонитрил. Поток – 0,150 мл/мин. Время проведения анализа – 20 мин, объём инъекции – 10 мкл.

Масс-спектрометрическое детектирование проводили в условиях ионизации электрораспылением (ИЭР). В источник ионизации подавался осушающий поток азота со скоростью 5 л/мин и температурой 350 °С. Напряжение на входном капилляре составляло минус 4000 В (для отрицательных ионов). Для регистрации, анализа и обработки экспериментальных данных применяли про-

граммное обеспечение «Agilent MassHunter» и «Microsoft Excel» (США).

Для идентификации веществ в образцах применялся следующий подход. Рассматривали только отрицательные ионы, поскольку все АПАВ хорошо детектируются в отрицательном режиме. Первоначально на хроматограмме полного ионного тока выделяли основные пики и определяли отношение массы к заряду (m/z) доминантного иона, соответствующего пику: депротонированные молекулы ([M-H]⁻). Далее при повторном хроматографическом разделении проводили анализ методом тандемной масс-спектрометрии: выделенный доминантный ион подвергали фрагментации в ячейке соударения путём столкновения с молекулой азота (N₂) при разных энергиях столкновения (10, 20 и 30 В). Далее по спектру ионов-фрагментов устанавливали возможное соединение путём сравнения спектров с открытой базой данных масс-спектров небольших химических соединений MassBank Project (www.massbank.eu) и проведения оценки их сходства с помощью программного обеспечения для идентификации масс-спектров, разработанного Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) (NIST MS Search v.2.4).

Для подтверждения предполагаемого состава и приблизительной оценки концентрации использовали коммерческий продукт сульфенол (Nexxo, Россия). В состав сульфенола входят натриевые соли алкилбензолсульфоокислот (80 %), сульфат натрия (20 %). Относительный количественный состав идентифицируемых солей алкилбензолсульфоокислот был оценён по соотношениям хроматографических пиков как 10 % (натрия децилбензолсульфонат, C10-БС), 85 % (натрия ундецилсульфонат, C11-БС), 5 % (натрия додецилсульфонат, C12-БС).

На основе препарата сульфенола путём разбавления готовили водные калибровочные

Таблица 1 / Table 1

Типы проанализированных проб / Samples analyzed

| Номер пробы Sample No. | Характеристика пробы Sample characteristics | Объект Object |
|---------------------------|---|--|
| 1 | сточная вода (до очистки) wastewater (before treatment) | водоочистные сооружения water treatment plants |
| 2 | очищенная сточная вода treated wastewater | водоочистные сооружения (сброс в озеро) / water treatment plants (discharge into the lake) |
| 3 | питьевая вода из подземного источника (купаж из трёх скважин) / underground drinking water (blend from three wells) | водозабор перед распределительной водопроводной сетью / water intake before the water distribution network |

растворы алкилбензолсульфонокислот натрия с диапазоном концентраций 0,001–2,000 мг/л, по которым были построены градуировочные графики зависимости сигнала иона от концентрации аналита. Для измерения сигнала применяли режим регистрации выделенных ионов (SIM, **selected ion monitoring**). Метрологические характеристики измерений представлены в таблице 2. Предел обнаружения ($C_{\text{мин}}$) определялся по минимальной концентрации аналита с $S/N > 3$ раза.

Результаты и обсуждение

Применены типичные условия хроматографического разделения, используемого для большинства полярных водорастворимых органических соединений: непрерывное изменение состава подвижной фазы с полярного растворителя (H_2O) на менее полярный растворитель (ацетонитрил) при стационарной фазе колонки C18 с градиентом от 95 до 10 % [6, 17].

На рисунке 1 представлены масс-хроматограммы пробы 1 сточной воды, полученные в двух режимах: 1) сканирования всех ионов с m/z от 50 до 1500; 2) регистрации выделенных ионов с конкретными значениями m/z . Установлено, что основные пики масс-хроматограммы полного сканирования определяются следующими ионами с m/z : 293, 297, 311, 325.

При повторном хроматографическом анализе, но уже с масс-детектированием в режиме выделенных ионов с вышеуказанными значениями m/z были получены ясно выраженные хроматографические пики, соответствующие

каждому отдельному соединению. Таким образом, в масс-хроматограмме были установлены четыре вещества, определяющие содержание пробы.

Стоит отметить, что при регистрации полного ионного тока (полном сканировании) абсолютная интенсивность аналитического сигнала обычно несколько выше, чем в режиме мониторинга выбранных ионов. Однако в этом случае одновременно фиксируется и более высокий уровень шума, что существенно затрудняет количественное определение аналита.

Для идентификации веществ при последующем повторном хроматографическом анализе с детектированием в режиме тандемной масс-спектрометрии были получены масс-спектры фрагментов ионов-прекурсоров (рис. 2).

Для последних трёх соединений, отмеченных на рисунке 2 цифрами 2–4, установлен характеристический повторяющийся специфический фрагмент при m/z 183, который может быть отнесён к соединению класса алкилбензолсульфонаты [11]. Ион при m/z 293 с характерным фрагментом m/z 80 может быть отнесён к другому классу АПАВ – алкилсульфаты [11]. Сравнение масс-спектров с базой данных известных соединений подтвердил данные предположения, показав высокие значения сходства (более 95 %). Таким образом, было установлено, что в пробе 1 сточной воды содержатся АПАВ (алкилбензолсульфонаты, C10-БС, C11-БС и C12-БС и алкилсульфаты C14). Результаты анализа представлены в таблице 3.

На основе полученных данных по идентификации АПАВ в пробе 1 были проведены

Таблица 2 / Table 2

Метрологические характеристики измерения алкилбензолсульфонокислот натрия
Metrological characteristics of sodium alkylbenzenesulfonate determination

| Аналит Analyte | $C_{\text{мин}}$, мг/л C_{min} , mg/L | Диапазон измерений, мг/л Measurement range, mg/L | R^2 | m/z | Время удерживания, мин Retention time, min |
|-------------------|--|---|-------|-------|---|
| C10-БС C10-BS | 0,012 | 0,01–1,00 | 0,93 | 297 | 9,9 |
| C11-БС C11-BS | 0,009 | 0,01–2,00 | 0,99 | 311 | 10,8 |
| C12-БС C12-BS | 0,004 | 0,01–1,00 | 0,98 | 325 | 11,5 |

Примечание: C10-БС – натрия децилбензолсульфонат, C11-БС – натрия ундецилбензолсульфонат, C12-БС – натрия додецилбензолсульфонат, $C_{\text{мин}}$ – предел обнаружения, R^2 – коэффициент детерминации, m/z – отношение массы к заряду.

Note: C10-BS – sodium decylbenzenesulfonate, C11-BS – sodium undecylbenzenesulfonate, C12-BS – sodium dodecylbenzenesulfonate, C_{min} – limit of detection, R^2 – coefficient of determination, m/z – ratio mass to charge.

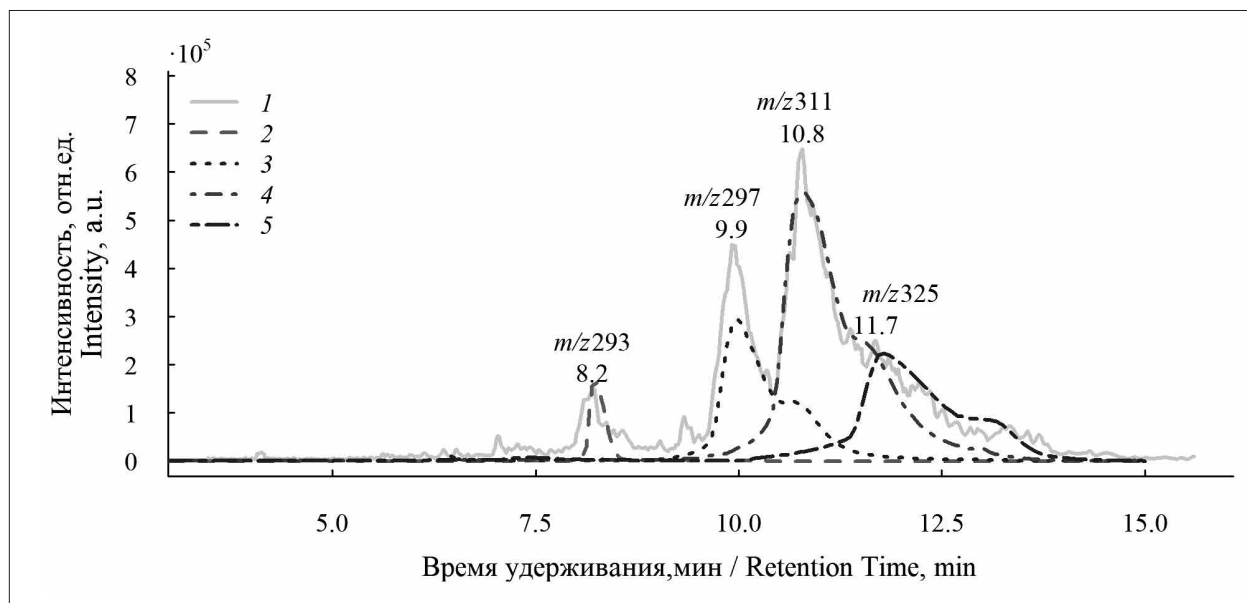


Рис. 1. Масс-хроматограммы сточной воды: 1 – полный ионный ток; в режиме регистрации выбранных отрицательных ионов (m/z): 2 – 293, 3 – 297, 4 – 311, 5 – 325
 Fig. 1. Mass chromatograms of wastewater sample: 1 – full ion scan; selected ion monitoring of negative ion (m/z): 2 – 293, 3 – 297, 4 – 311, 5 – 325

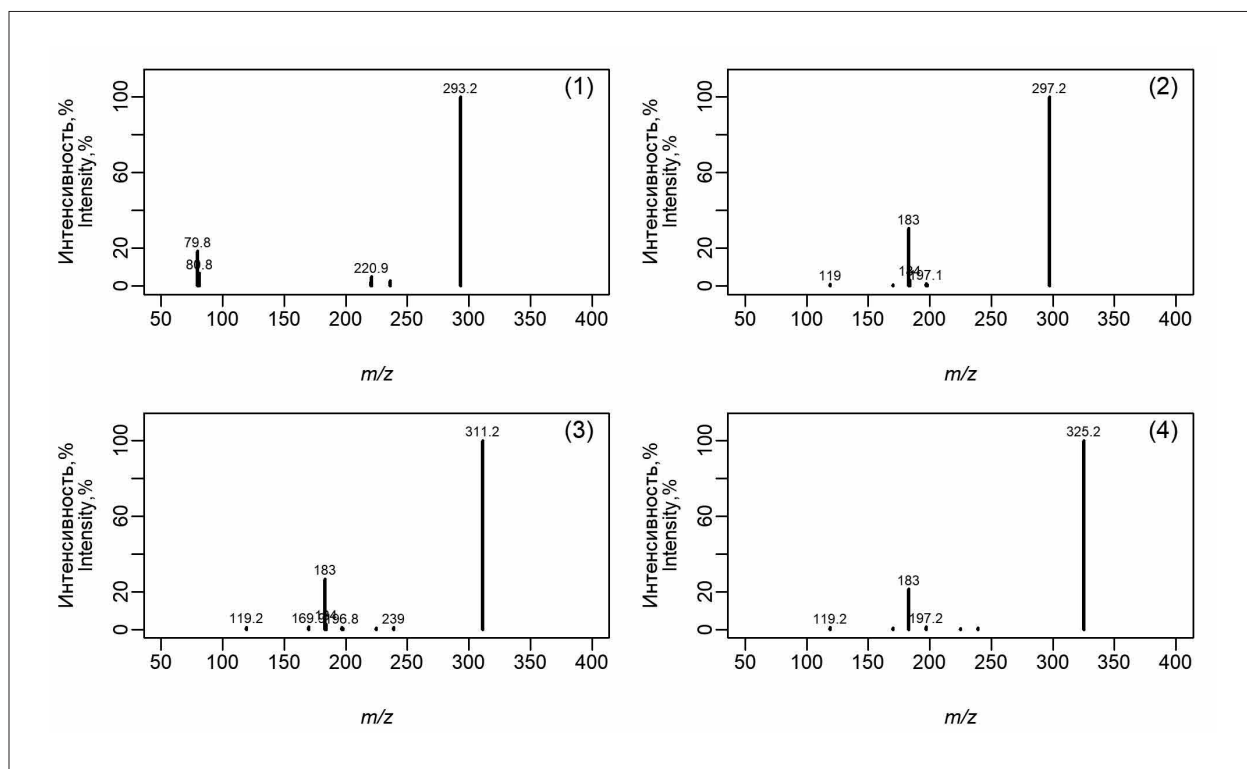


Рис. 2. Масс-спектры ионов-продуктов, полученных при фрагментации следующих ионов-прекурсоров (m/z): 1 – 293, 2 – 297, 3 – 311, 4 – 325
 Fig. 2. Mass spectra product ions obtained from precursor ions (m/z): 1 – 293, 2 – 297, 3 – 311, 4 – 325

Таблица 3 / Table 3

Анионные ПАВ, обнаруженные в образце сточных вод / Defined anionic surfactants in wastewater sample

| Время удерживания, мин Retention time, min | m/z ион-прекурсора m/z of precursor ion | Характеристические фрагментные ионы Characteristic fragment ions | Идентифицируемое соединение Defined compounds |
|---|--|---|---|
| 8,2 | 293 | 80 | Миристилсульфат (C14-АС) Myristylsulfate (C14-AS) |
| 9,9 | 297 | 183, 119 | Децилбензолсульфонат (C10-БС) Decylbenzenesulfonate (C10-BS) |
| 10,8 | 311 | 183, 119 | Деканилбензолсульфонат (C11-БС) Undecylbenzenesulfonate (C11-BS) |
| 11,7 | 325 | 183, 119 | Додецилбензолсульфонат (C12-БС) Dodecylbenzenesulfonate (C12-BS) |

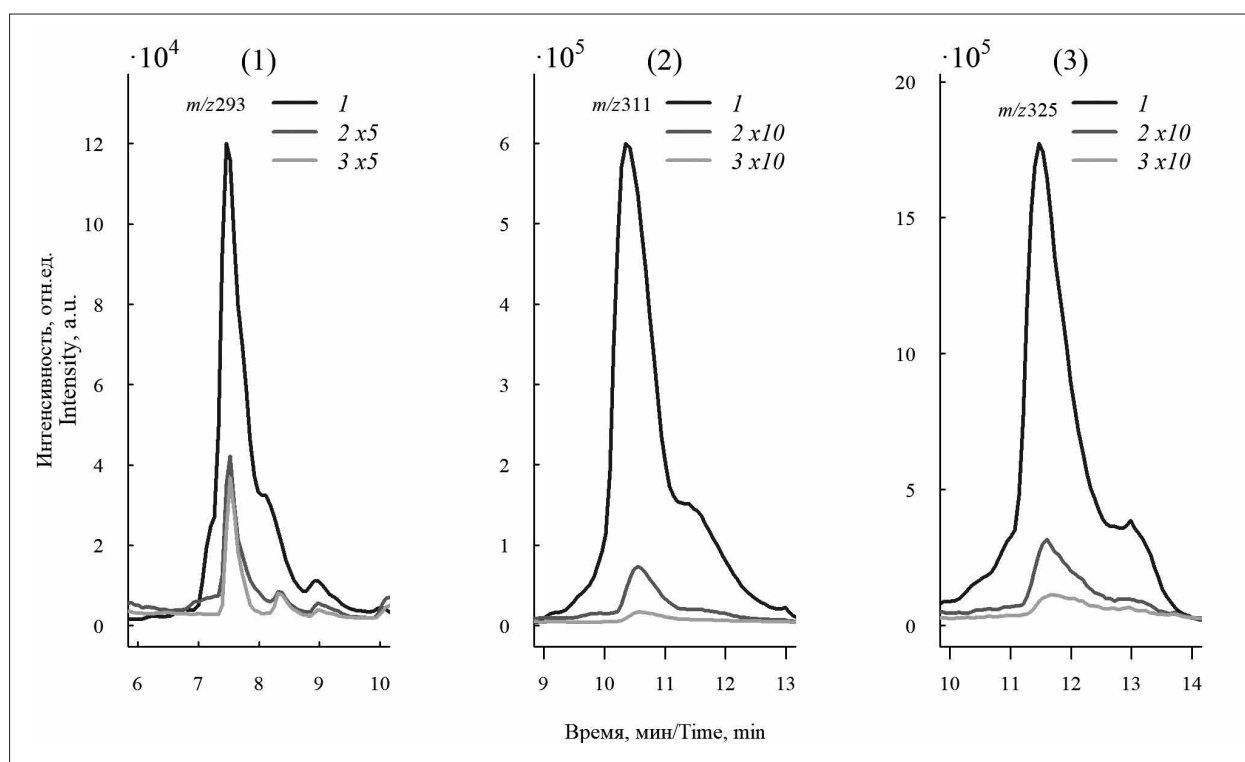


Рис. 3. Масс-хроматограммы миристилсульфата (1), деканилбензолсульфоната (2) и додецилбензолсульфоната (3) для трёх типов проб (см. табл. 1)

Fig. 3. Mass chromatograms of myristyl sulfate (1), decanyl benzenesulfonate (2) and dodecyl benzenesulfonate (3) for three sample types (see Table 1)

исследования проб очищенной сточной и питьевой (артезианской) воды. На рисунке 3 представлены сравнительные масс-хроматографические данные для всех проб, по которым можно дать оценку о наличии остаточного содержания АПАВ.

Как видно, после прохождения очистных сооружений концентрация АПАВ существенно уменьшается. Эффективность (\mathcal{E}) очистки рассчитывали по изменению площади хроматографического пика вещества на входе ($S_{вх}$) и выходе ($S_{вых}$) сооружения:

$$\mathcal{E} = \frac{(S_{вх} - S_{вых})}{S_{вх}} \cdot 100\% \quad (1)$$

По данным проведённой оценки для алкилбензолсульфонокислот эффективность очистки составила 99 %, а для алкилсульфоната – 97 %.

По градуировочному графику были оценены концентрации следовых количеств наблюдаемых алкилбензолсульфонокислот (табл. 4).

Полученные данные подтверждают предположение о наличии в очищенной сточной

Таблица 4 / Table 4

Содержание АПАВ (бензолсульфонаты) в водных пробах
Anionic surfactants content (benzenesulfonates) in water sample

| Аналит Analyte | Содержание АПАВ (бензолсульфонаты), мг/л в пробе: Anionic surfactants content (benzenesulfonates), mg/L in water sample: | | |
|-------------------|---|-------------|-------------|
| | 1 | 2 | 3 |
| C10-BC / C10-BS | 12 ± 2 | 0,07 ± 0,01 | > 0,01 |
| C11-BC / C11-BS | 99 ± 20 | 0,9 ± 0,2 | 0,07 ± 0,05 |
| C12-BC / C12-BS | 33 ± 7 | 0,2 ± 0,1 | > 0,01 |

воде следовых количеств АПАВ, что свидетельствует о необходимости ведения мониторинга качества воды для оценки и прогнозирования загрязнения водных объектов ПАВ.

Заключение

Предложен комплексный подход к анализу водных проб, охватывающий все этапы исследования: от пробоподготовки до хроматографического разделения с масс-спектрометрическим детектированием на содержание АПАВ, включая линейные алкилбензолсульфонаты и алкилсульфаты натрия.

Комбинация режимов детектирования (полного сканирования и тандемной масс-спектрометрии) обеспечивает одновременный мониторинг сразу нескольких химических соединений C10-C12 бензолсульфонатов и C-14 алкилсульфатов, что способствует оперативному реагированию и оптимизации процессов очистки сточных вод. Внедрение данного подхода позволит повысить экологическую безопасность водных объектов, улучшить качество очищенных сточных вод и минимизировать антропогенную нагрузку на водные экосистемы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУ «ЦСП» ФМБА России РАН (тема «Индикатор риска 25-27»).

Литература

1. Трифонова Т.А., Чеснокова С.М., Савельев О.В. Оценка влияния синтетических поверхностно-активных веществ на экосистему малого водотока // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 4. С. 20–25. doi: 10.35776/VST.2022.04.03
2. Рынок ПАВ – Размер, производители, доля отрасли и рост [Электронный ресурс] <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/surfactants-market> (Дата обращения: 17.03.2025).
3. Закиров Р.К., Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С. Перспективы сонохимической обработки сточных вод, содержащих синтетические поверхностно-активные

вещества // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 111–116. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116

4. Курбатов А.Ю., Мурзина Е.Д., Ветрова М.А., Иванцова Н.А. Обеспечение качества и безопасности процесса питьевой водоподготовки на примере р. Ганг // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 4. С. 96–104. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-096-104

5. Bautista Quispe J.I., Campos L.C., Mašek O., Bogush A. Removal of anionic surfactant from aqueous solutions by adsorption onto biochars: characterisation, kinetics, and mechanism // Environ. Technol. 2024. V. 45. No. 26. P. 5723–5744. doi: 10.1080/09593330.2024.2304677

6. Šima J., Havelka M., Holcová V. Removal of anionic surfactants from wastewater using a constructed wetland // Chem. Biodivers. 2009. V. 6. No. 9. P. 1350–1363. doi: 10.1002/cbdv.200900108

7. Bazel Y.R., Antal I.P., Lavra V.M., Kormosh Zh.A. Methods for the determination of anionic surfactants // J. Anal. Chem. 2014. V. 69. P. 211–236. doi: 10.1134/S1061934814010043

8. Ferradj A., Idouhar M. Determination of anionic surfactants in wastewater treatment plant in Algiers City // Desalin. Water Treat. 2016. V. 57. No. 53. P. 25677–25685. doi: 10.1080/19443994.2016.1157038

9. Орлова А.О., Лизунова Г.М., Зорин А.Д. Определение содержания анионных и неионных поверхностно-активных веществ в синтетических моющих средствах при помощи жидкостных ионоселективных электродов // Аналитика и контроль. 2004. № 2. С. 131–136.

10. Куренкова О.В. Методы определения поверхностно-активных веществ в природных и сточных водах // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Сер.: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. 2013. № 6. С. 138–142.

11. Budetić M., Jozanović M., Pukleš I., Samardžić M. Review of potentiometric determination of cationic surfactants // Rev. Anal. Chem. 2024. V. 43. No. 1. Article No. 20230078. doi: 10.1515/revac-2023-0078

12. Шачнева Е.Ю. Методы определения неионогенных поверхностно-активных веществ // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2015. № 6. С. 18–23.

13. Amelin V.G., Shogah Z.A., Bol'shakov D.S. Identification of cationic and anionic surfactants by chromatography-mass-spectrometry in the microextraction-fluorimetry

screening of water and food products // *J. Anal. Chem.* 2001. V. 76. P. 592–602. doi: 10.1134/S106193482105004X

14. Wiest L., Giroud B., Assoumani A., Lestremau F., Vulliet E. A multi-family offline SPE LC-MS/MS analytical method for anionic, cationic and non-ionic surfactants quantification in surface water // *Talanta.* 2021. V. 232. Article No. 122441. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122441

15. Min K., Yang Q., Zhong X., Yan D., Luo W., Fang Z., Xiao J., Ma M., Chen B. Rapid analysis of anionic and cationic surfactants in water by paper spray mass spectrometry // *Anal. Methods.* 2021. V. 13. No. 8. P. 986–995. doi: 10.1039/d0ay02215b

16. Barco M., Planas C., Palacios O., Ventura F., Rivera J., Caixach J. Simultaneous quantitative analysis of anionic, cationic, and nonionic surfactants in water by electrospray ionization mass spectrometry with flow injection analysis // *Anal. Chem.* 2003. V. 75. No. 19. P. 5129–5136. doi: 10.1021/ac020708r

17. Майер В.Р. Практическая высокоэффективная жидкостная хроматография. М.: Техносфера, 2019. 410 с.

References

1. Trifonova T., Chesnokova S., Savel'ev O. Estimating the effect of synthetic surfactants on the ecosystem of a small watercourse // *Water supply and sanitary technique.* 2022. No. 4. P. 20–25 (in Russian). doi: 10.35776/VST.2022.04.03

2. Surfactants market – Size, manufacturers, industry share and growth (2024–2029) [Internet resource] <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/surfactants-market> (Accessed: 17.03.2025) (in Russian).

3. Zakirov R.K., Akhmadullina F.Y., Balyмова E.S. Prospects for sonochemical treatment of wastewater containing synthetic surfactants // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 111–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116

4. Kurbatov A.Yu., Murzina E.D., Vetrova M.A., Ivantsova N.A. Ensuring quality and safety for the process of drinking water treatment: case-study of the Ganges River // *Theoretical and Applied Ecology.* 2024. No. 4. P. 96–104 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-096-104

5. Bautista Quispe J.I., Campos L.C., Mašek O., Bogush A. Removal of anionic surfactant from aqueous solutions by adsorption onto biochars: characterisation, kinetics, and mechanism // *Environ. Technol.* 2024. V. 45. No. 26. P. 5723–5744. doi: 10.1080/09593330.2024.2304677

6. Sima J., Havelka M., Holcová V. Removal of anionic surfactants from wastewater using a constructed wetland // *Chem. Biodivers.* 2009. V. 6. No. 9. P. 1350–1363. doi: 10.1002/cbdv.200900108

7. Bazel Y.R., Antal I.P., Lavra V.M., Kormosh Zh.A. Methods for the determination of anionic surfactants // *J. Anal. Chem.* 2014. V. 69. P. 211–236. doi: 10.1134/S1061934814010043

8. Ferradj A., Idouhar M. Determination of anionic surfactants in wastewater treatment plant in Algiers City // *Desalin. Water Treat.* 2016. V. 57. No. 53. P. 25677–25685. doi: 10.1080/19443994.2016.1157038

9. Orlova A.O., Lizunova G.M., Zorin A.D. Definition of the concentration of anionic and nonionic surfactants in synthetic washing-up liquids with selective electrodes // *Analitika i kontrol'.* 2004. No. 2. P. 131–136 (in Russian).

10. Kurenkova O.V. Methods of definition of surface-active substances in natural water and sewage // *Nauchnyj Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya* 2013. No. 6. P. 138–142 (in Russian).

11. Budetić M., Jozanović M., Pukleš I., Samardžić M. Review of potentiometric determination of cationic surfactants // *Rev. Anal. Chem.* 2024. V. 43. No. 1. Article No. 20230078. doi: 10.1515/revac-2023-0078

12. Shachneva E.Yu. Methods nonionic surface-active substances // *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodospabzhenie.* 2015. No. 6. P. 18–23 (in Russian).

13. Amelin V.G., Shogah Z.A., Bol'shakov D.S. Identification of cationic and anionic surfactants by chromatography-mass-spectrometry in the microextraction-fluorimetry screening of water and food products // *J. Anal. Chem.* 2001. V. 76. P. 592–602. doi: 10.1134/S106193482105004X

14. Wiest L., Giroud B., Assoumani A., Lestremau F., Vulliet E. A multi-family offline SPE LC-MS/MS analytical method for anionic, cationic and non-ionic surfactants quantification in surface water // *Talanta.* 2021. V. 232. Article No. 122441. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122441

15. Min K., Yang Q., Zhong X., Yan D., Luo W., Fang Z., Xiao J., Ma M., Chen B. Rapid analysis of anionic and cationic surfactants in water by paper spray mass spectrometry // *Anal. Methods.* 2021. V. 13. No. 8. P. 986–995. doi: 10.1039/d0ay02215b

16. Barco M., Planas C., Palacios O., Ventura F., Rivera J., Caixach J. Simultaneous quantitative analysis of anionic, cationic, and nonionic surfactants in water by electrospray ionization mass spectrometry with flow injection analysis // *Anal. Chem.* 2003. V. 75. No. 19. P. 5129–5136. doi: 10.1021/ac020708r

17. Mayer V.R. Practical high-performance liquid chromatography. Moskva: Tekhnosfera, 2019. 410 p. (in Russian).

Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование

© 2026. А. В. Кузнецов^{1,2}, д. б. н., в. н. с., Д. Н. Втюрина³, к. х. н., с. н. с.,

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

²Севастопольский государственный университет, 299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33,

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, 119991, Россия, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4, e-mail: kuznet61@gmail.com

Обрастание морских конструкций приводит к экономическим потерям из-за коррозии и повышенного гидродинамического сопротивления, что делает проблему актуальной для прикладной экологии. В отличие от традиционных подходов, таких как использование токсичных красок, перспективным решением представляется акустическое воздействие, требующее всесторонней оценки его влияния на морские экосистемы, что относится к сфере теоретической экологии. Таким образом, предотвращение обрастания является важной задачей, объединяющей экономические интересы и экологические исследования. В данной работе изучалось влияние звука малой мощности на процессы адгезии морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты в летний период 2024 г. Эксперимент проводился в двух идентичных ёмкостях, одна из которых служила контрольной, а в другой использовался акустический излучатель с диапазоном частот 0–30 кГц. Оседание *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) на стеклянных пластинах в опытной группе значительно снижалось по сравнению с контрольной ($p < 0,01$). Экспериментальные данные подчёркивают многоступенчатость процесса обрастания. Имитационное моделирование, проведённое с использованием агентно-ориентированного подхода, выявило сложные структурные отношения внутри популяции обрастателей. Результаты важны для понимания экологических аспектов процесса обрастания и могут быть использованы для разработки экологически безопасных методов борьбы с обрастанием сооружений в моря.

Ключевые слова: акустические воздействия, адгезия, микрообрастание, биозащита, агентное моделирование.

Broadband acoustic impact on the adhesion of marine fouling organisms from Sevastopol Bay: experimental study and modeling

© 2026. A. V. Kuznetsov^{1,2} ORCID: 0000-0002-0015-7994

D. N. Vtyurina³ ORCID: 0000-0002-1192-9988

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

²Sevastopol State University, 33, Universitetskaya St., Sevastopol, Russia, 299053,

³N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics Russian Academy of Sciences, 4, Kosygina St., Moscow, Russia, 119991, e-mail: kuznet61@gmail.com

This study investigates the effects of low-power broadband acoustic waves on the adhesion of marine fouling organisms from Sevastopol Bay. Designed to evaluate the potential of acoustic methods as an environmentally friendly alternative to traditional toxic coatings for preventing biofouling on artificial structures, the experiment was conducted during the summer of 2024. The experimental setup consisted of two identical containers: one serving as a control and the other equipped with an acoustic emitter operating in the frequency range of 0–30 kHz. Glass slides were placed in both containers to monitor the adhesion of marine organisms. The results indicated a statistically significant reduction ($p < 0.01$) in *Mytilaster lineatus* (Gmelin, 1791) fouling on the glass slides within the experimental container compared to the control.

This suggests that low-power acoustic waves can effectively suppress the biofouling initial stages, potentially disrupting the settlement and growth of marine organisms on underwater surfaces. Agent-based modeling was employed to further elucidate the ecological dynamics. This computational approach enabled the simulation of complex interactions within the fouling community, revealing intricate structural relationships and changes in the composition and development of biofouling communities. The model demonstrated various community development scenarios, providing valuable insights into the ecological consequences of interventions. Overall, the results underscore the importance of considering multiple factors in the management of marine biofouling. This study not only contributes to the theoretical understanding of fouling processes but also offers practical insights for developing sustainable and environmentally sound strategies to mitigate biofouling on marine infrastructure. Future research should focus on optimizing acoustic parameters and investigating the long-term ecological consequences of such interventions across diverse marine environments.

Keywords: acoustic effects, adhesion, microfouling, bioprotection, agent-based modeling.

Существуют основания полагать, что наиболее интересные события в области физики, химии и биологии происходят на границах раздела фаз [1]. В этом контексте процессы адгезии и обрастания представляют собой не только актуальную практическую задачу [2–4], но и значимую тему для теоретических исследований [5–8]. Сообщества обрастания в разных районах Мирового океана имеют свои особенности [9, 10]. В литературе имеется множество работ, посвящённых изучению динамики обрастания, в которых активно применяются статистические методы [11]. Также много внимания уделяется вопросам управления процессом обрастания [12] и исследованию его сложности и универсальности [13, 14]. Разнообразие поверхностей, подверженных обрастанию, является удивительным и охватывает широкий спектр материалов [15, 16]. Проблема защиты от обрастания остаётся одной из актуальных и нерешённых задач в области науки и прикладных исследований [5, 17].

Морские организмы, такие как водоросли и моллюски, представляют собой серьёзную проблему для судоходства, нефтегазовой промышленности и морских сооружений. Процесс обрастания приводит к увеличению гидродинамического сопротивления, снижению скорости судов, повышенному расходу топлива и ускоренной коррозии [18]. Традиционные методы борьбы с обрастанием, в том числе использование токсичных красок, могут оказывать негативное воздействие на морскую среду [19]. В последние годы ультразвуковые волны высокой частоты стали рассматриваться как перспективный метод предотвращения обрастания, поскольку они способны нарушать жизнедеятельность морских организмов и предотвращать их прикрепление к поверхностям [20]. Современные исследования показывают, что ультразвук может быть эффективно использован для этих целей [21, 22]. Наиболее распространёнными частотами

для этих исследований являются 20 и 40 кГц, что обусловлено их хорошей проникающей способностью в водной среде и воздействием на морские организмы. Следует отметить, что диапазон частот ультразвуковых импульсов в академических и медицинских исследованиях достаточно широк и варьируется от 20 кГц до 100 мГц [23].

Процессы адгезии и обрастания морских организмов на различных поверхностях являются актуальной проблемой, как с практической, так и с теоретической точки зрения. С одной стороны, обрастание морских конструкций приводит к экономическим потерям из-за коррозии и увеличения гидродинамического сопротивления [2, 3]. С другой стороны, изучение механизмов обрастания способствует пониманию экологических взаимодействий в морской среде [5, 6]. В данной работе мы фокусируемся на изучении воздействия звука малой мощности в диапазоне 0–30 кГц на адгезию морских организмов-обрастателей с целью выявления трактовок механизмов воздействия звука на экосистемные процессы.

Объекты и методы исследования

В ходе исследования проведена оценка как экспериментальных данных, так и результатов имитационного моделирования для отражения сложной динамики обрастания и его экологических последствий. В рамках эксперимента, проводимого на базе ИнБЮМ, г. Севастополь, были использованы две ёмкости из полиэтилена объёмом по 20 л, которые непрерывно освещали лампой GLF-600-8BT-FITO с полным спектром. В период с июля по сентябрь 2024 г. в них осуществляли еженедельную замену морской воды, отобранной на набережной возле института. Одна из ёмкостей служила в качестве контрольной, в то время как в другую был помещён акустический излучатель SFM-27 размером 30 × 16 мм, использующий пьезоэлемент. Для предотвра-

щения намокания, звукоизлучатель был упакован в полиэтиленовые пакеты. Управление пьезоэлементом осуществлялось с помощью микроконтроллера на плате Arduino Nano. Частота звука варьировалась дискретно, с шагом в 1 Гц, в диапазоне от 0 до 30 кГц, с использованием циклов инкремента и декремента. На каждой частоте звук воспроизводился в течение 10 мс.

В оба резервуара с морской водой были погружены предметные стёкла на поплавках, которые периодически вынимали из воды на короткое время для анализа и возвращали обратно. Стёкла осматривали визуально методом слепой пробы и подвергали экспертной оценке. Образцы просматривали под микроскопами Микромед MC-4, Nikon SMZ800 N или Nikon Eclipse Ts2R, оценивали плотность микрообращения по пикселям на фотографиях с помощью анализатора изображений, а также подсчитывали число организмов на стёклах. Статистический анализ проводили в среде R.

Для имитационного моделирования многократно запускали написанную самостоятельно программу *fouling11.py*, в которой воплощены базовые принципы агентного моделирования (Agent Based Modeling, ABM) и объектно-ориентированного программирования (Object-Oriented Programming (OOP)). Меняя начальное количество агентов и шанс на репродукцию, исследовали пространство возможных сценариев. Использовали парк из 4 компьютеров ICL SafeRAY S131.Mi со следующими характеристиками: 64bit Intel Core i5-10400 CPU, 16 Gb RAM, Ubuntu 22.04 LTS Linux. В зависимости от общего числа шагов программы и хода вычислений, физическое время расчётов составляло от нескольких десятков минут до нескольких часов.

Результаты и обсуждение

Наблюдения свидетельствуют, что микрообращение стеклянных поверхностей в морской воде – это динамичный процесс, который происходит в несколько этапов и приводит к образованию сложного сообщества морских организмов. Примерно через два месяца, когда сформировалась визуально видимая биоплёнка, поверхность начали заселять двусторчатые моллюски – митиластр полосатый *Mytilaster lineatus* Gmelin, 1791 (рис. 1а–в). Они прикрепляются к стеклу, начинают расти и передвигаться по поверхности в поисках удобного места (рис. 1а, б).

Из известных факторов, влияющих на интенсивность обрастания, как температура воды (тёплая вода способствует более быстрому росту гидробионтов), наличие питательных веществ и света для некоторых организмов, действие звука в диапазоне до 30 кГц оказалось критическим для сообщества обрастателей. Толщина биоплёнки и количество микроколоний было значительно меньше в опытных пробах. Микрообращение в течение 3 месяцев с июля по сентябрь 2024 г. в нормальных условиях (рис. 1а–в) было в несколько раз интенсивнее, чем в опыте со звуком в диапазоне 0–30 кГц и мощностью 1 Вт (рис. 1г). Плотность фона изображений по числу пикселей в оттенках серого в контроле (рис. 1а–в) примерно в 20 раз превышает эксперимент (рис. 1г), видны отдельные микроколонии.

Подсчёт количества личинок *M. lineatus* на предметных стёклах привёл к следующим результатам: в контроле среднее число организмов на стёклышке составило $6,25 \pm 2,67$ с доверительным интервалом 4,47–8,03, а для экспериментальной группы, обрабатываемой звуком, – $0,50 \pm 0,67$ с доверительным интервалом 0,11–0,89. Медианное представление данных с квантилями в виде «ящичков с усами» изображено на рисунке 2. В контроле и опыте было исследовано по 6 стёкол с двумя сторонами: контроль – без звука, опыт – с воздействием звука, где значение $p = 2,44e^{-6} < 0,01$, следовательно, гипотеза о равенстве средних отвергается. На основании статистической оценки расхождения результатов можно сделать вывод, что звук в диапазоне 0–30 кГц с вероятностью более 99 % оказывает значимое влияние на организмы, заселяющие поверхность стеклянных пластин.

С целью дополнить экспериментальные данные и показать сложность нелинейных процессов обрастания, было проведено имитационное моделирование. Компьютерная симуляция для двумерного пространства с тремя типами агентов, где агенты первого уровня питаются неисчерпаемым субстратом, а другие образуют пищевую цепь, выявило сценарий, где виртуальные организмы первого уровня неограниченно размножаются, являясь пищей для остатка цепи, что создаёт условия для заполнения поверхности субстрата организмами всех уровней (рис. 3, см. цв. вкладку I). Код описывает процесс обрастания для двумерного случая, где агенты-обрастатели взаимодействуют друг с другом, движутся в пространстве (2D) или по поверхности (1D) и размножаются; начальное число

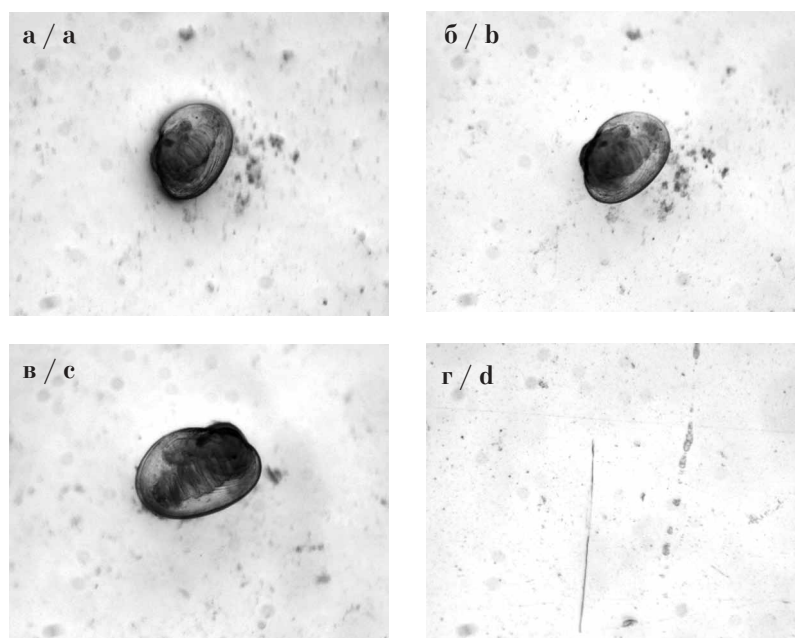


Рис. 1. Двустворчатые *Mytilaster lineatus*, осевшие и развившиеся на предметных стёклах:
 а-в – контроль, без звука; г – эксперимент, со звуком; увеличение ×80
 Fig. 1. *Mytilaster lineatus* bivalves settled and developed on glass slides:
 а-с – control, without sound; d – experiment, with sound; magnification ×80

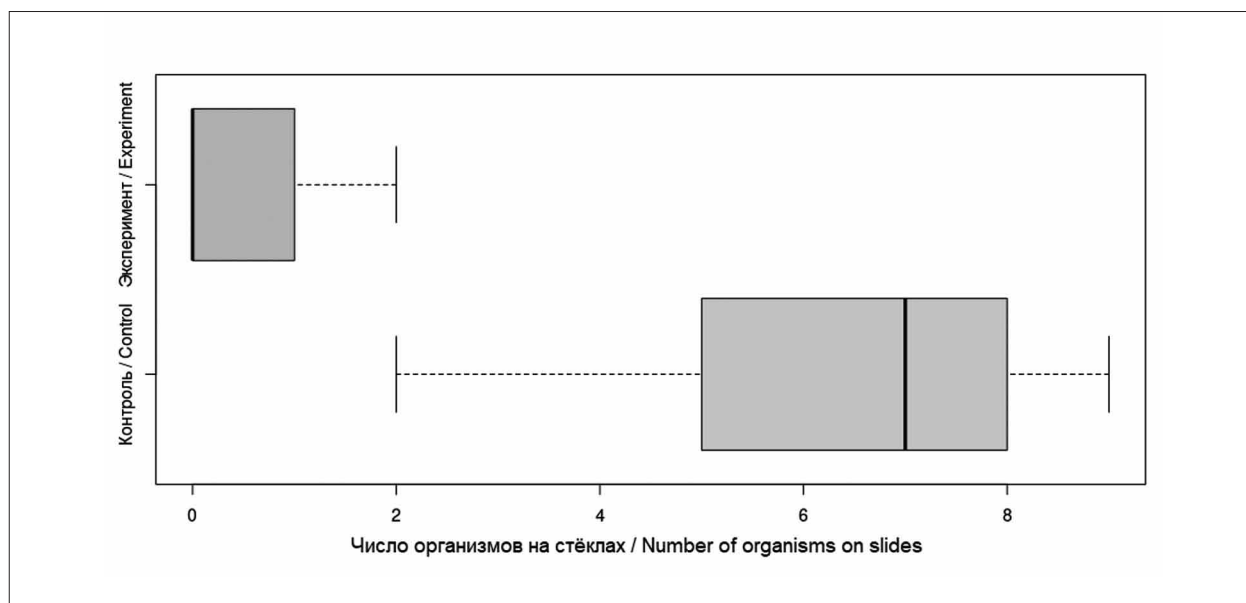


Рис. 2. Количество молоди моллюсков *Mytilaster lineatus* на поверхности предметных стёкол
 Fig. 2. Number of young *Mytilaster lineatus* on the surface of microscope slides

А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина
«Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование». С. 48

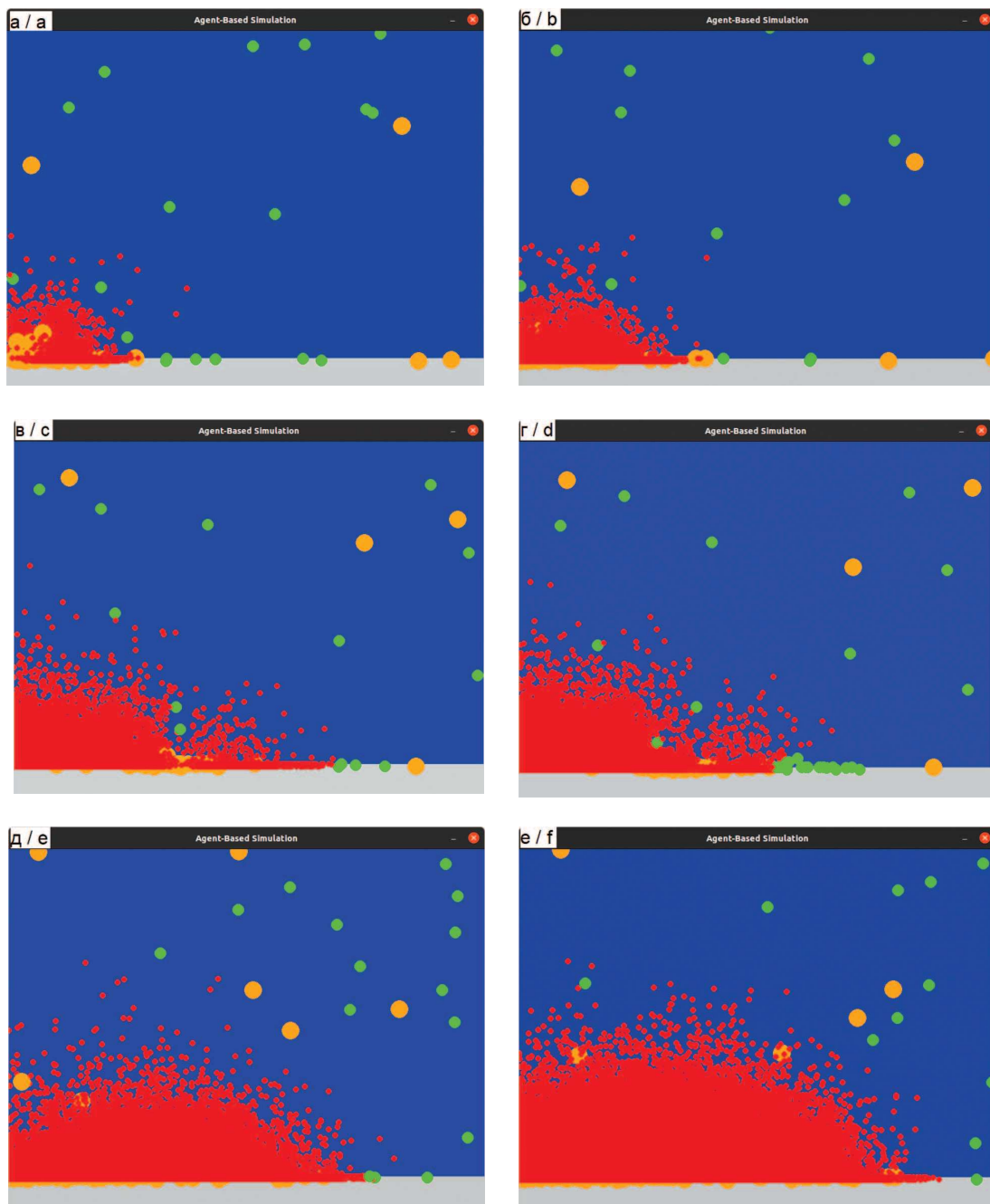


Рис. 3. Последовательные этапы (а–е) обрастания поверхности гидробионтами в модельном эксперименте. Здесь и далее на рисунках: красным цветом показаны обрастатели первого уровня, питающиеся субстратом (серый), зелёным – обрастатели второго уровня, питающиеся обрастателями первого уровня, оранжевым – обрастатели третьего уровня, которые поедают обрастателей второго уровня

Fig. 3. Sequential stages (a–f) of surface fouling by hydrobionts in a simulation experiment. Here and further in the pictures: red – the first-level foulers feeding on the substrate (gray), green – the second-level foulers feeding the first-level foulers, orange – the third-level foulers that eat the second-level foulers

А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина
«Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование». С. 48

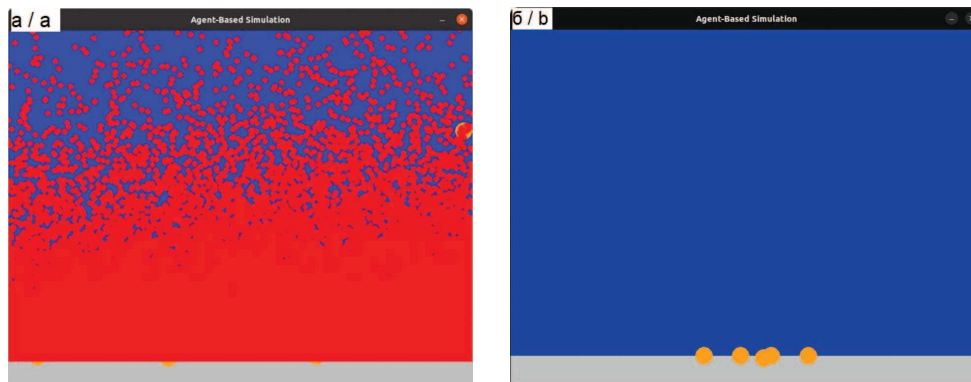


Рис. 4. Альтернативные устойчивые состояния системы с угнетённой репродукцией виртуальных организмов при длительной симуляции: а) неограниченный рост обрастателей первого уровня, б) выжившие обрастатели третьего уровня / **Fig. 4.** Alternative stable states of a system with suppressed reproduction of virtual organisms during long-term simulation: a) unlimited growth of the first-level foulders, b) the third-level foulders that survived

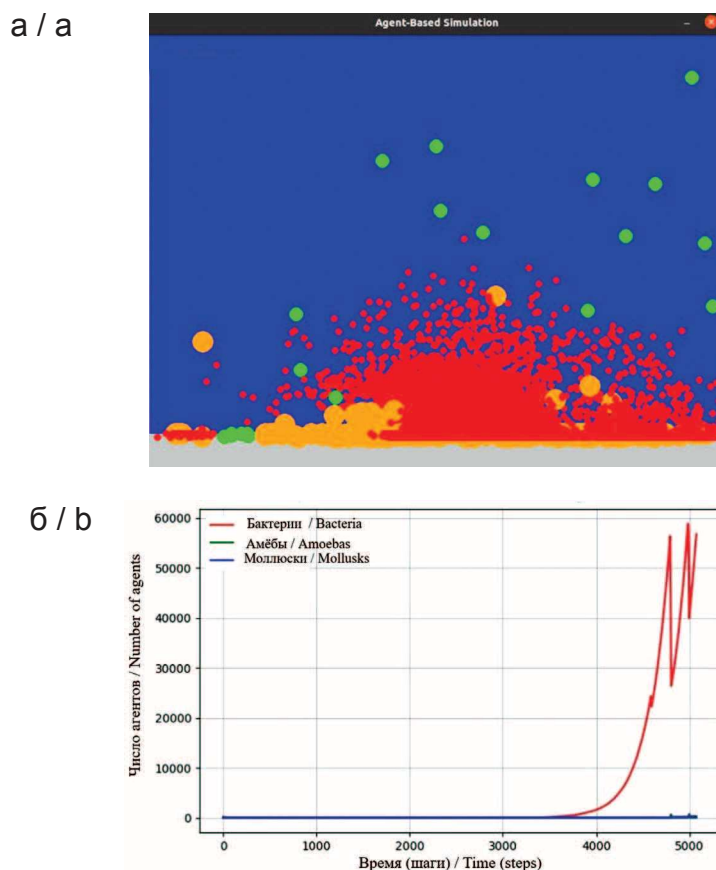


Рис. 5. Сукцессия виртуального сообщества обрастания: а) замена обрастателей первого («бактерии») и второго («амёбы») уровня на обрастателей третьего уровня («моллюски»); б) изменение количества обрастателей во времени **Fig. 5.** Succession of a virtual fouling community: a) replacement of the first-level (“bacteria”) and the second level (“amoebas”) foulders by the third-level foulders (“mollusks”); b) changes in the number of foulders over time

А. В. Кузнецов, Д. Н. Втюрина
«Широкополосное акустическое воздействие на адгезию морских организмов-обрастателей из Севастопольской бухты: экспериментальное исследование и моделирование». С. 48

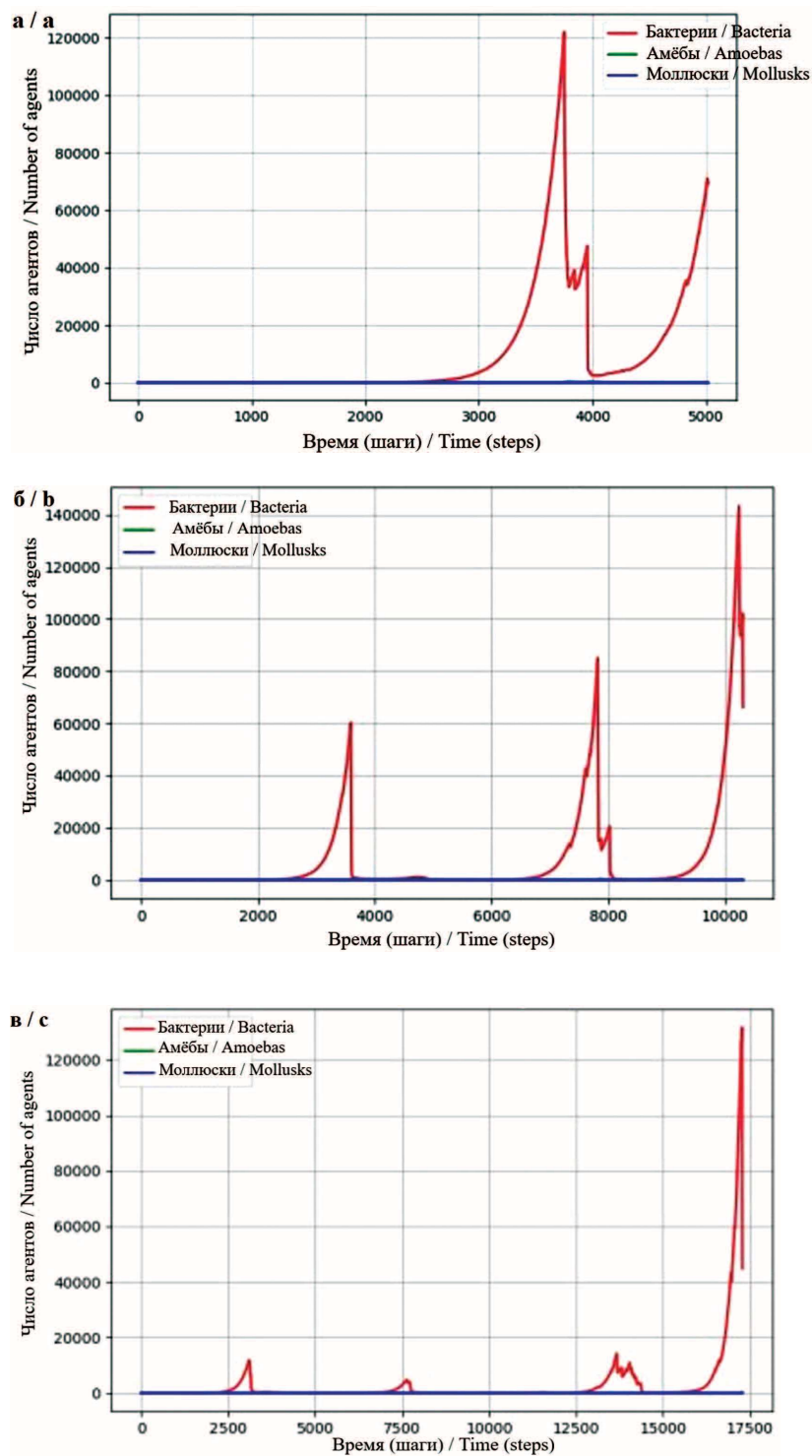


Рис. 6. Примеры последовательных множественных сукцессий при обрастании: а) краткосрочная, б) промежуточная и в) длительная симуляции / **Fig. 6.** Examples of consecutive multiple successions during fouling: а) short-term, б) intermediate, в) long-term simulations

организмов разных типов составляет 200, 50 и 5, соответственно; шанс на репродукцию всех организмов – 1 %; время симуляции 600 или 6000 программных циклов. Данный сценарий (рис. 3, см. цв. вкладку I) развивается в половине случаев. Изменение начального числа организмов в симуляции приводит к конечному состоянию с преобладанием агентов первого и/или третьего уровней в виртуальной пищевой цепи. Следует отметить сложность отношений между агентами-обрастателями на поверхности в локальных областях, приводящих к замене одних организмов другими, что подобно экологической сукцессии. Агенты могут оседать на поверхность и покидать колонию при размножении. Программа имитирует динамику развития популяции в течение заданного времени. Агенты первого уровня демонстрируют экспоненциальный рост, который могут прерывать агенты второго уровня (рис. 3а–г). Ситуация критическим образом зависит от взаимного положения агентов на одномерной поверхности, так как агенты 3-го уровня могут «защищать» агентов 1-го уровня от агентов 2-го уровня.

На следующем этапе моделирования вероятность размножения всех агентов уменьшали в 10 или 100 раз по сравнению с нормой (контролем), что соответствует внешнему экспериментальному воздействию. Такое изменение программы замедляет процесс обрастания и порождает альтернативные сценарии развития событий: а) неограниченный медленный рост агентов первого типа (рис. 4а, см. цв. вкладку II); б) **терминальное выживание агентов** третьего типа (рис. 4б, см. цв. вкладку II), что не предполагает полноценного обрастания в биологическом смысле. Вместо комплексного обрастания поверхности сообществом организмов мы получаем образование однородного бактериального мата или заселение малочисленными агентами последнего уровня (рис. 4), где начальное число организмов разных типов 200, 50 и 5, шанс на репродукцию для всех организмов 0,1 или 0,01 %, а время симуляции 6000 программных циклов.

К наиболее драматичным событиям при имитационном моделировании обрастания поверхности приводило непропорциональное изменение шансов на репродукцию у отдельных типов агентов, что на практике соответствует избирательному экспериментальному воздействию на отдельные виды организмов. В таком случае происходит нарушение баланса в системе (рис. 5, см. цв. вкладку II), где начальное число агентов разных типов

200, 50 и 5, а шанс на репродукцию 0,05, 0,5 и 1 %, соответственно, и появляются случаи частой замены одних агентов другими (рис. 6, см. цв. вкладку III), где использованы обозначения как на рисунке 5. Понижение вероятности размножения виртуальных «амёб» и «моллюсков» на два порядка приводило к развитию «бактериального мата» в 66 % случаев. Напротив, исключение отдельных типов организмов или парами из симуляции вело к однообразным результатам.

Защита от обрастателей с помощью ультразвука – это технология, которая использует высокочастотные звуковые волны для предотвращения или минимизации биологического обрастания подводных конструкций и поверхностей. Существует два основных способа защиты от обрастания с помощью ультразвука: 1) **кавитация**, при которой ультразвук высокой интенсивности вызывает кипение воды, что приводит к физическому уничтожению живых организмов и биоплёнки, которая их поддерживает; 2) **субкавитация**, при которой звук вызывает вибрацию поверхностей, к которым прикреплен преобразователь, что препятствует адгезии биообрастающих частиц на субстрате. Важно отметить, что ультразвуковые системы защиты от обрастания обычно только поддерживают чистоту поверхности; они не способны очистить субстрат, на котором уже сформировались очаги биообрастания. В связи с этим ультразвук является скорее мерой профилактики. Предназначение любой системы защиты от обрастания – сохранять чистоту поверхности. Повышение мощности ультразвукового устройства обычно снижает плотность поселения и разнообразие видов [21]. Альтернативный подход основан на предположении, что специфические звуковые воздействия низкой интенсивности могут восприниматься механорецепторами как сигнал к откреплению клетки от субстрата [24]. Однако природа таких сигналов и их рецепторов, а также пути трансдукции до конца не изучены [25, 26], поэтому мы использовали программный меандр.

Наблюдения за процессом обрастания пластиковых поверхностей в морской воде зимой и стеклянных поверхностей в летний период свидетельствуют о том, что данный процесс представляет собой динамическое явление, которое протекает в несколько этапов и приводит к образованию сложного сообщества морских организмов. Сначала на поверхность оседают бактерии и микроводоросли [27]. Эти микроскопические организмы об-

разуют тонкую, опалесцирующую биоплёнку, которая служит основой для дальнейшего обрастания (рис. 1а–в). Образовавшаяся биоплёнка становится местом обитания для многих морских организмов, включая разнообразных инфузорий и червей, которые добавляют соответствующие звенья в сложную экосистему. Последующий этап включает оседание более крупных организмов, таких как личинки моллюсков, которые прикрепляются к стеклу и начинают расти. Такие митилиды, как митилистр полосатый (*Mytilaster lineatus*), активно передвигаются по поверхности в поисках оптимального положения (рис. 1а, б). Оседание личинок митилистра в наших опытах совпало с периодом его активного размножения в конце лета [28].

В данном исследовании было установлено, что действие звука частотой до 30 кГц существенно влияет на процесс обрастания. Интенсивность микрообрастания, выраженная в количестве тёмных пикселей на цифровых изображениях, была в 20 раз ниже в экспериментальной группе (рис. 1г), по сравнению с контрольной группой (рис. 1а–в). Тот факт, что стекло не пропускает ультрафиолетовое (УФ) излучение с длиной волны менее 380 нм, не помешало нам использовать одну из характерных оптических активностей полисахаридов на длине 320 нм для выявления достоверного отличия между биоплёнками в контроле и под экспериментальным воздействием (данные не представлены). Подсчёт осевших особей и статистический анализ показали, что звук в диапазоне 0–30 кГц с вероятностью более 99 % оказывает влияние на количество организмов, присутствующих на стеклянных поверхностях (рис. 2).

Следует отметить богатство черноморских перифитонных организмов-обрастателей, принадлежащих к семействам Hydrozoa, Ascidiacea, Bryozoa, Polychaeta, Bivalvia и Cirripedia [48]. Так, в бухте Казачья было отмечено 22 вида макрообрастателей, относящихся к 8 крупным таксонам: гидроидные полипы, усонogie раки, актинии, мшанки, полихеты, двустворчатые моллюски, оболочники и макрофиты [29]. В ходе длительного исследования мы наблюдали появление в эксперименте со звуком организмов, которых не наблюдали в контроле, т. е. без звукового воздействия. Например, на озвучиваемых пластинах были обнаружены планарии, а результат соскоба и ПЦР-анализа в реальном времени дал на 35–50 циклах интенсивный сигнал о наличии ДНК дрожжеподобных гри-

бов *Malassezia* spp. в пробе (данные не приводятся), которые могут встречаться в морской среде [30, 31]. Всё это указывает на сложность и неоднозначность процессов обрастания, что акцентировалось ранее [32].

Представленная модель обрастания, включающая три типа агентов, которые образуют пищевую цепь, демонстрирует ряд интересных аналогий с агрегацией, ограниченной диффузией (Diffusion Limited Aggregation, DLA). Подобно DLA [33], в модели обрастания наблюдается формирование кластеров из агентов в результате их размножения и пространственного взаимодействия. При неограниченном питании агенты первого уровня образуют крупные агрегаты, заполняя всю доступную поверхность. Как и в DLA, где ключевую роль в формировании структур играет диффузия частиц, в модели обрастания скорость случайного перемещения агентов также должна влиять на их распределение и взаимодействие. В обоих процессах различные типы агентов конкурируют за пространство. В модели обрастания это выражается в замене одних агентов другими, что напоминает экологическую сукцессию [34]. Наша модель реалистично воспроизводит поэтапное развитие биоплёнки, включая фазы адгезии, образования монослоя, созревания, роста и дисперсии – выброс бактерий (рис. 3), хорошо известные микробиологам [35, 36].

Однако в отличие от DLA, модель обрастания рассматривает более сложную систему с тремя типами агентов, образующих пищевую цепь. Это позволяет моделировать тонкие биологические взаимодействия и динамику популяции организмов-обрастателей. Внешние факторы, например, влияющие на репродукцию, существенно изменяют динамику агентов при симуляции. Предложенная модель демонстрирует разные сценарии развития событий, что делает её гибкой и позволяет иллюстрировать действие внешних факторов на процесс обрастания. Уменьшение вероятности размножения агентов на порядок приводит в десятой доле случаев к формированию бактериального мата в эксперименте *in silico* (рис. 4а), что согласуется с образованием слизистой плёнки на поверхности стекла в лабораторном эксперименте (рис. 1г).

Кроме того, имитационная модель обрастания позволяет исследовать множество дополнительных вопросов (рис. 5, 6). Как на динамику модели влияют различные значения параметров: способ передвижения, скорость размножения и смертность? Как можно обоб-

щить предлагаемый подход для моделирования более сложных экосистем с большим количеством видов? Каким образом можно использовать модель для прогнозирования развития реальных событий, таких как обрастание кораблей или морских сооружений?

Заключение

Наблюдения за процессом обрастания пластиковых и стеклянных поверхностей в морской воде показали, что это динамическое явление, которое протекает в несколько этапов и приводит к образованию сложного сообщества морских организмов. Использование ультразвукового воздействия для предотвращения обрастания представляет собой инновационную технологию, которая может быть полезна для понимания механизмов взаимодействия организмов с окружающей средой. В данной работе установлено, что действие звука частотой до 30 кГц существенно влияет на процесс обрастания, снижая количество осевших организмов. Это указывает на потенциальную возможность использования акустического воздействия как альтернативного метода для предотвращения обрастания. Имитационное моделирование с использованием агентно-ориентированного подхода позволило выявить сложные структурные отношения внутри популяции обрастателей и продемонстрировать различные сценарии развития событий при изменении внешних факторов. Наша модель имеет ряд аналогий с известными экосистемными процессами, включая сукцессию и агрегацию [34] и, несмотря на свою простоту, демонстрирует механизмы образования кластеров. Она рассматривает комплекс агентов, взаимодействующих в пищевой цепи. Натурные эксперименты и моделирование показали, что применение акустического воздействия может приводить к образованию бактериального мата со слизистой полисахаридной поверхностью, которая не только не увеличивает, но и, возможно, даже уменьшит гидродинамическое сопротивление. Данное исследование подчёркивает необходимость дальнейшего изучения методов акустической биозащиты в контексте сохранения морского биоразнообразия и устойчивости экосистем.

Благодарим Пасенина С.Н и Рябушко В.И. за поддержку, Ревкова Н.К. за консультацию по личинкам митилястра, Холодова А.В. за помощь при проведении ПЦР, Царина С.А., Шадрина Н.В. и Петрова А.Н. за критическое

прочтение рукописи, Празукина А.В. за обсуждение, Пепина И.С., Савицкого М.А и Шуралёва Л.А. за помощь в работе. Работа выполнена в соответствии с темами № 124022400152-1 и № 124022400148-4), «1.13 Фемтосекундная лазерная фотоника, масс-спектрометрия и спинтроника сложных химических и биологических систем», № 122040500074-1, Код научной темы: FFZE-2022-015.

Литература

1. Айзатуллин Т.А., Лебедев В.Л., Хайлов К.М. Океан. Активные поверхности и жизнь. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 191 с.
2. Никитин В.Н. Биология обрастания судов в Чёрном море // Докл. АН СССР. 1947. Т. 58. № 6. С. 1183–1185.
3. Chambers L.D., Stokes K.R., Walsh F.C., Wood R.J.K. Modern approaches to marine antifouling coatings // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 201. No. 6. P. 3642–3652. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.129
4. Ryabushko L.I., Bondarenko A.V., Miroshnichenko E.S., Lishaev D.N., Shiroyan A.G. Diatoms and cyanobacteria of periphyton of experimental synthetic polymer materials in Karantinnaya Bay in the Black Sea // Inland Water Biol. 2020. V. 13. No. 3. P. 399–407. doi: 10.1134/S1995082920020285
5. Fouling Science and Technology / Eds. L.F. Melo, T.R. Bott, C.A. Bernardo. Dordrecht: Springer, 1988. 744 p. doi: 10.1007/978-94-009-2813-8
6. Бобкова А.Н. Сезонные изменения структуры и биохимического состава микроперифитона // Гидробиол. журн. 1990. Т. 26. № 2. С. 33–37.
7. Гринцов В.А., Мурина В.В., Евстигнеева И.К. Биоразнообразие и структура сообщества обрастания твёрдых субстратов Карадагского природного заповедника (Чёрное море) // Мор. экол. журн. 2005. Т. 4. № 3. С. 37–47.
8. Раилкин А.И. Колонизация твердых тел бентосными организмами. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2008. 427 с.
9. Зевина Г.Б. Обрастания в морях СССР. М.: Изд-во МГУ, 1972. 219 с.
10. Брайко В.Д. Обрастание в Чёрном море. Киев: Наукова думка, 1985. 123 с.
11. Горбенко Ю.А., Крышев И.И. Статистический анализ динамики морской экосистемы микроорганизмов. Киев: Наукова думка, 1985. 144 с.
12. Савельев И.Б., Вольберг М.М., Гусев М.В. Методы исследования и пути управления взаимодействием партнёров в альгобактериальных ассоциациях // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 16, Биология. 1990. № 1. С. 3–4.
13. Зевина Г.Б. Биология морского обрастания. М.: Изд-во МГУ, 1994. 134 с.
14. Раилкин А.И., Твердов А.И., Отвалко Ж.А., Коротков С.И., Фомин С.Е. Оценка противобрастающих

свойств материалов по показателям обилия многовидовых сообществ обрастания // Вода: Химия и экология. 2015. № 7. С. 52–56.

15. Бондаренко А.В., Рябушко Л.И., Благинина А.А. Подвержены ли биообрастанию синтетические медицинские маски в морской воде? // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 114–128.

16. Рябушко Л.И., Мирошниченко Е.С., Широ-ян А.Г. Биологическое обрастание бассейна Карадагского дельфинария (Крым, Чёрное море) // Экосистемы. 2024. № 37. С. 7–16. doi: 10.29039/2413-1733-2024-37-7-16

17. Раилкин А.И., Отвалко Ж.А., Коротков С.И., Фомин С.Е., Кулева Н.В. Концепция экологически безопасной защиты от морского обрастания и её разработка с использованием каучук-эпоксидных покрытий // Морской биол. журн. 2017. Т. 2. № 3. С. 40–52. doi: 10.21072/mbj.2017.02.3.04

18. Смирнова Л.Л. Методология изучения обрастания в прибрежных акваториях Чёрного моря и экспедиционных исследованиях в Индийском и Атлантическом океанах. Севастополь: ИПТС, 2021. 155 с. doi: 10.33075/978-5-6047088-1-1

19. Gomez-Banderas J. Marine natural products: a promising source of environmentally friendly antifouling agents for the maritime industries // Front. Mar. Sci. 2022. V. 9. Article No. 858757. doi: 10.3389/fmars.2022.858757

20. Долгопольская М.А., Аксельбанд А.М. Действие ультразвуковых колебаний на организмы морских обрастаний и процесс обрастания // Труды Севастопольской биологической станции. 1964. Т. 17. С. 309–324.

21. Неврова Е.Л., Петров А.Н., Мороз Н.А., Касьянов А.Б. Экспериментальное изучение воздействия ультразвука на микроперифитон искусственных субстратов с целью защиты от биопомех систем технического водоснабжения атомных электростанций // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2023. № 3. С. 98–113.

22. Зацаринная Т.Г., Мороз Н.А., Анисевич К.П., Неврова Е.Л., Петров А.Н. Ультразвук в технологиях борьбы с биообрастаниями в системах оборотного водоснабжения на АЭС // Энергетические установки и технологии. 2024. Т. 10. № 1. С. 42–54.

23. Passmann C., Ermert H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1996. V. 43. No. 4. P. 545–552. doi: 10.1109/58.503714

24. Кузнецов А.В., Гришин И.Ю., Втюрина Д.Н. Пространственные модели пьезобелков и сетей белок-белковых взаимодействий у трихоплакса (пластинчатые) // Молекулярная биология. 2023. Т. 57. № 5. С. 895–897. doi: 10.31857/S0026898423050075

25. Фадеева М.В., Сергеева Е.В., Рыбакова К.А., Кузнецов А.В. Характеристика семейства катионных TRPA1-каналов *Trichoplax* sp. H2 (Placozoa) // Актуальные вопросы биологической физики и химии. 2022. Т. 7. № 3. С. 493–500. doi: 10.29039/rusjbpce.2022.0550

26. Kuznetsov A.V., Vtyurina D.N. Spatial reconstruction of TRPC mechanoreceptors in the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 // Mol. Biol. 2023. V. 57. No. 4. P. 755–763. doi: 10.1134/S0026893323040106

27. Dempsey M.J. Marine bacterial fouling: a scanning electron microscope study // Mar. Biol. 1981. V. 61. P. 305–315. doi: 10.1007/BF00401570

28. Валовая Н.А. О формировании поселений *Mytilaster lineatus* в прибрежной зоне Чёрного моря // Донные сообщества и морские обрастания / Отв. ред. В.Е. Заика. Киев: Наукова думка, 1979. Вып. 48. С. 48–53.

29. Лебедевская М.В. Мшанки в сообществе обрастания искусственных субстратов в бухте Казачья Чёрного моря // Вестник РУДН. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 3. С. 313–322. doi: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-313-322

30. Gao Z., Li B., Zheng C., Wang G. Molecular detection of fungal communities in the Hawaiian marine sponges *Suberites zeteki* and *Mycale armata* // Appl. Environ. Microbiol. 2008. V. 74. No. 19. P. 6091–6101. doi: 10.1128/AEM.01315-08

31. Amend A. From dandruff to deep-sea vents: *Malassezia*-like fungi are ecologically hyper-diverse // PLoS Pathog. 2014. V. 10. No. 8. Article No. e1004277. doi: 10.1371/journal.ppat.1004277

32. Кузнецов А.В., Петров А.Н., Пиркова А.В., Сергеева Е.В. Структура механорецепции и способность к адгезии у молоди мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) при воздействии ультразвука // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 4 (54). С. 41–51. doi: 10.33075/2220-5861-2023-4-41-51

33. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. No. 19. P. 1400–1403. doi: 10.1103/PhysRevLett.47.1400

34. Полтаруха О.П. Об изучении сукцессии сообщества обрастания на противоположающихся покрытиях // Экология моря. 2000. Т. 52. С. 39–43.

35. Немцева Н.В. Изучение образования биоплёнок в питьевой воде в процессе водоподготовки // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2017. Т. 2. 10 с. [Электронный ресурс] <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-2/Articles/NVN-2017-2.pdf> (Дата обращения: 25.04.2025).

36. Симонова И.Р., Головин С.Н., Веркина Л.М., Березняк Е.А., Титова С.В. Методы культивирования и изучения бактериальных биоплёнок // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. № 1. С. 73–79. doi: 10.51620/3034-1981-2024-29-4-194-19

References

1. Aizatullin T.A., Lebedev V.L., Khailov K.M. Ocean. Active surfaces and life. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 191 p. (in Russian).

2. Nikitin V.N. Biology of vessel fouling in the Black Sea // *Doklady AN SSSR*. 1947. V. 58. No. 6. P. 1183–1185 (in Russian).
3. Chambers L.D., Stokes K.R., Walsh F.C., Wood R.J.K. Modern approaches to marine antifouling coatings // *Surf. Coat. Technol.* 2006. V. 201. No. 6. P. 3642–3652. doi: 10.1016/j.surfcoat.2006.08.129
4. Ryabushko L.I., Bondarenko A.V., Miroshnichenko E.S., Lishaev D.N., Shiroyan A.G. Diatoms and cyanobacteria of periphyton of experimental synthetic polymer materials in Karantinnaya Bay in the Black Sea // *Inland Water Biol.* 2020. V. 13. No. 3. P. 399–407. doi: 10.1134/S1995082920020285
5. *Fouling Science and Technology* / Eds. L.F. Melo, T.R. Bott, C.A. Bernardo. Dordrecht: Springer, 1988. 744 p. doi: 10.1007/978-94-009-2813-8
6. Bobkova A.N. Seasonal changes in the structure and biochemical composition of microperiphyton // *Hydrobiol. J.* 1990. V. 26. No. 2. P. 33–37 (in Russian).
7. Grintsov V.A., Murina V.V., Evstigneyeva I.K. Biodiversity and structure of fouling community on the hard substrata of Karadag natural reservation (the Black Sea) // *Mar. Ecol. J.* 2005. V. 4. No. 3. P. 37–47 (in Russian).
8. Raikina A.I. Colonization of solid bodies by benthic organisms. Sankt-Peterburg: Publishing House of St. Petersburg University, 2008. 427 p. (in Russian).
9. Zevina G.B. Fouling in the seas of the USSR. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1972. 219 p. (in Russian).
10. Brayko V.D. Fouling in the Black Sea. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 123 p. (in Russian).
11. Gorbenko Yu.A., Krychev I.I. Statistical analysis of the dynamics of the marine ecosystem of microorganisms. Kiev: Naukova Dumka, 1985. 144 p. (in Russian).
12. Saveliev I.B., Volberg M.M., Gusev M.V. Methods of studying and managing partner interactions in algal-bacterial associations // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16. Biologiya*. 1990. No. 1. P. 3–4 (in Russian).
13. Zevina G.B. Biology of marine fouling. Moskva: Publishing House of Moscow State University, 1994. 134 p. (in Russian).
14. Raikina A.I., Tverdov A.I., Otvalko Z.A., Korotkov S.I., Fomin S.E. The assessment of antifouling properties of materials upon indicators of abundance of many species fouling communities // *Water: Chemistry and Ecology*. 2015. No. 7. P. 52–56 (in Russian).
15. Bondarenko A.V., Ryabushko L.I., Blagynina A.A. Are polymer-based single-use face masks subject biofouling in seawater? // *Ecological safety of coastal and shelf zones of the sea*. 2023. No. 3. P. 114–128 (in Russian).
16. Ryabushko L.I., Miroshnichenko E.S., Shiroyan A.G. Biological fouling in the Karadag Dolphinarium (Crimea, Black Sea) // *Ekosistemy*. 2024. No. 37. P. 7–16 (in Russian). doi: 10.29039/2443-1733-2024-37-7-16.
17. Raikina A.I., Otvalko Zh.A., Korotkov S.I., Fomin S.E., Kuleva N.V. Concept of environmentally friendly protection against sea fouling and its development using epoxy-rubber coats // *Mar. Biol. J.* 2017. V. 2. No. 3. P. 40–52 (in Russian). doi: 10.21072/mbj.2017.02.3.04
18. Smirnova L.L. Methodology of studying fouling in coastal waters of the Black Sea and expedition research in the Indian and Atlantic Oceans. Sevastopol: IPTS, 2021. 155 p. (in Russian). doi: 10.33075/978-5-6047088-1-1
19. Gomez-Banderas J. Marine natural products: a promising source of environmentally friendly antifouling agents for the maritime industries // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. Article No. 858757. doi: 10.3389/fmars.2022.858757
20. Dolgopolskaya M.A., Axelband A.M. The effect of ultrasonic vibrations on marine fouling organisms and the fouling process // *Trudy Sevastopolskoy biologicheskoy stantsii*. 1964. V. 17. P. 309–324 (in Russian).
21. Nevrova E.L., Petrov A.N., Moroz N.A., Kasyanov A.B. Experimental study of the effect of ultrasound effect on microperiphyton on artificial substrates for fouling protection of technical water supply circuit of nuclear power plants // *Ecological safety of coastal and shelf zones of the sea*. 2023. No. 3. P. 98–113 (in Russian).
22. Zatsarinnyaya T.G., Moroz N.A., Anikevich K.P., Nevrova E.L., Petrov A.N. Ultrasound in biofouling control technologies in circulating water supply systems at nuclear power plants // *Energy Installations and Technologies*. 2024. V. 10. No. 1. P. 42–54 (in Russian).
23. Passmann C., Ermert H. A 100-MHz ultrasound imaging system for dermatologic and ophthalmologic diagnostics // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. 1996. V. 43. No. 4. P. 545–552. doi: 10.1109/58.503714
24. Kuznetsov A.V., Grishin I.Yu., Vtyurina D.N. Spatial models of piezoproteins and networks of protein-protein interactions in *Trichoplax* animals (Placozoa) // *Molecular Biology*. 2023. V. 57. No. 5. P. 895–897 (in Russian). doi: 10.31857/S0026898423050075
25. Fadeeva M.V., Sergeeva E.V., Rybakova K.A., Kuznetsov A.V. Characteristics of the cationic TRPA1-channels family in *Trichoplax* sp. H2 (Placozoa) // *Russian Journal of Biological Physics and Chemistry*. 2022. V. 7. No. 3. P. 493–500 (in Russian). doi: 10.29039/rusjbpce.2022.0550
26. Kuznetsov A.V., Vtyurina D.N. Spatial reconstruction of TRPC mechanoreceptors in the ctenophore *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 // *Mol. Biol.* 2023. V. 57. No. 4. P. 755–763. doi: 10.1134/S0026893323040106
27. Dempsey M.J. Marine bacterial fouling: a scanning electron microscope study // *Mar. Biol.* 1981. V. 61. P. 305–315. doi: 10.1007/BF00401570
28. Valovaya N.A. On the formation of *Mytilaster lineatus* colonies in the coastal zone of the Black Sea // *Benthic communities and marine fouling* / Ed. V.E. Zaika. Kiev: Naukova Dumka, 1979. No. 48. P. 48–53 (in Russian).
29. Lebedovskaya M.V. Bryozoans in fouling communities on artificial substrates in Kazachya Bay of the Black

Sea // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023. V. 31. No. 3. P. 313–322 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-313-322

30. Gao Z., Li B., Zheng C., Wang G. Molecular detection of fungal communities in the Hawaiian marine sponges *Suberites zeteki* and *Mycale armata* // Appl. Environ. Microbiol. 2008. V. 74. No. 19. P. 6091–6101. doi: 10.1128/AEM.01315-08

31. Amend A. From dandruff to deep-sea vents: *Malassezia*-like fungi are ecologically hyper-diverse // PLoS Pathog. 2014. V. 10. No. 8. Article No. e1004277. doi: 10.1371/journal.ppat.1004277

32. Kuznetsov A.V., Petrov A.N., Pirkova A.V., Sergeeva E.V. Structure of mechanoreception and adhesion capability in juvenile mussels *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) under ultrasound impact // Monitoring systems of environment. 2023. No. 4 (54). P. 41–51 (in Russian). doi: 10.33075/2220-5861-2023-4-41-51

33. Witten T.A., Sander L.M. Diffusion-limited aggregation, a kinetic critical phenomenon // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. No. 19. P. 1400–1403. doi: 10.1103/PhysRevLett.47.1400

34. Poltarukha O.P. On the study of the succession of the fouling community on antifouling coatings // Ecologiya Morya. 2000. No. 52. P. 39–43 (in Russian).

35. Nemtseva N.V. Study of the formation of biofilms in drinking water in the process of technological preparation // Bulletin of the Orenburg Scientific Center of the Ural Branch of RAS. 2017. V. 2. 10 p. [Internet resource] <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2017-2/Articles/NVN-2017-2.pdf> (Accessed: 25.04.25) (in Russian).

36. Simonova I.R., Golovin S.N., Verkina L.M., Berzaniak E.A., Titova S.V. Methods of culturing and studying bacterial biofilms // Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. 2017. No. 1. P. 73–79 (in Russian). doi: 10.51620/3034-1981-2024-29-4-194-198

Научно-практические подходы к функциональному зонированию государственного природного заказника «Пижемский» (Кировская область)

© 2026. Е. А. Домнина¹, к. б. н., н. с., С. В. Шабалкина², к. б. н., доцент, О. Н. Пересторонина², к. б. н., доцент, А. С. Тимонов^{1,2}, ведущий инженер,

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

²Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36, e-mail: edomnina68@gmail.com

Государственный природный заказник (ГПЗ) «Пижемский» регионального значения имеет особую ценность для сохранения водных биоценозов и уникальных природных объектов в бассейне среднего и нижнего течения р. Вятки, сохранения и воспроизводства редких и исчезающих видов растений и животных. В составе заказника находится большое количество объектов, объявленных памятниками природы. Территорию ГПЗ «Пижемский» обследовали в летний период 2025 г.: проводили сплав по рр. Пижда и Немда, наземные выезды и пешие маршруты. В ходе исследования выявляли наличие антропогенного воздействия на 86 площадках, оценивали рекреационную нагрузку в местах расположения уникальных ландшафтов и произрастания редких видов растений. Интенсивность антропогенного воздействия оценена как высокая в местах расположения основных посещаемых природных объектов и комплексов, на регулярно используемых площадках кемпинговой рекреации на берегах р. Немды, а также в двух местах по берегам р. Пижды. На остальных участках берега в границах водоохранной зоны рекреационная нагрузка носит нерегулярный и умеренно интенсивный характер. На основе анализа опубликованных и фондовых материалов, нормативных правовых документов, данных Росреестра, разновременных спутниковых снимков с интернет-ресурсов Google Earth PRO и SAS.Планета, а также результатов собственных натурных обследований в пределах заказника предложено выделить три функциональные зоны: рекреации, хозяйственного использования и особой охраны. Разработанная схема функционального зонирования позволит сохранить благоприятные условия для природных комплексов и ландшафтов, существования популяций редких и нуждающихся в охране видов, рационально вести природопользование.

Ключевые слова: заказник, памятник природы, антропогенное воздействие, рекреационная нагрузка, функциональное зонирование.

Scientific and practical approaches to functional zoning of the Pizhenskiy State Nature Reserve (Kirov Oblast)

© 2026. E. A. Domnina¹ ORCID: 0000-0002-5063-8606, S. V. Shabalkina² ORCID: 0000-0002-6157-1312, O. N. Perestoronina² ORCID: 0000-0002-1051-2195, A. S. Timonov^{1,2} ORCID: 0000-0001-8560-3051

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

²Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000, e-mail: edomnina68@gmail.com

Pizhenskiy State Nature Reserve (SNR) located in the Kirov Region. A scheme of its functional zoning is proposed. The Pizhenskiy SNR is of particular importance for preserving aquatic biocenoses and unique natural objects in the middle and lower reaches of the Vyatka River, as well as for preserving and reproducing rare and endangered plant and animal species. The reserve includes a large number of notable objects that have been declared natural monuments. The territory of the Pizhenskiy SNR was surveyed in the summer of 2025. The survey included rafting on the Pizhma and Nemda rivers, as well as ground trips and hiking routes. The study identified anthropogenic impact at 86 sites and

assessed the recreational load in areas with unique landscapes and rare plant species. The intensity of anthropogenic impact can be assessed as high in the areas of the main visited natural sites and complexes, as well as in the regularly used camping recreation sites on the banks of the Nemda River, and in two locations on the banks of the Pizhma River. In the remaining areas of the shore within the boundaries of the water protection zone, the recreational load is irregular and moderately intense. Based on a comprehensive study and analysis of published and archival materials, legislation, regulatory legal documents, extracts from the Unified State Register of Real Estate, time-series satellite images from the Internet resources Google Earth PRO and SAS.Planet, as well as the results of our own field surveys within the reserve, it is proposed to allocate three functional zones: recreation zone; economic use zone; special protection zone. The developed functional zoning scheme will help preserve favorable conditions for natural complexes and landscapes, the existence of populations of rare and endangered species, and ensure rational environmental management.

Keywords: nature reserve, natural monument, anthropogenic impact, recreational load, functional zoning.

Сохранение биологического разнообразия является общей задачей человечества, о чём прописано в Конвенции о биологическом разнообразии, принятой на конференции ООН в 1992 г. Основным условием для этого признано сохранение *in situ*, т. е. сохранение экосистем и естественных мест обитания особей, поддержание и восстановление жизнеспособных популяций видов в их естественной среде. Оптимальным способом сохранения биоразнообразия *in situ* считается организация особо охраняемых природных территорий (ООПТ). В России существуют следующие категории ООПТ: государственный природный заповедник, национальный парк, природный парк, государственный природный заказник, памятник природы, дендрологические парки и ботанические сады (Федеральный закон РФ от 14.03.1995 № 33-ФЗ).

В ООПТ природоохранная функция является основной, однако в пределах многих из них имеются участки, на которых расположены населённые пункты, сельскохозяйственные угодья, пашни; ведутся судоходство, рыбная ловля, рекреация; проживают малые коренные народы со своими традиционными видами хозяйствования; имеются транспортные коммуникации и т. д. В связи с этим возникает противоречие между необходимостью сохранения экосистем, популяций редких и нуждающихся в охране видов и ведения природопользования.

Одним из способов решения проблемы пространственного совмещения различных функций охраняемыми территориями является зонирование [1–3]. Однако, законодательно предложены зоны лишь для национальных парков, природных парков, дендрологических парков и ботанических садов. Зонирование заказников – одной из наиболее распространённых ООПТ в России – Федеральным законом от 14.03.1995 № 33-ФЗ не предусмотрено.

Между тем, в природоохранной практике имеются примеры и схемы территориального разделения заказников с выделением разного

числа и наименований функциональных зон, например, в Ставропольском [4], Алтайском [5, 6], Краснодарском краях и Республике Хакасия [6], Тюменской [7–9], Белгородской [10], Ленинградской, Томской [6], Челябинской областях [11] и других регионах.

В Кировской области имеются три государственных природных заказника (ГПЗ) регионального значения. Один из них – ГПЗ «Пижемский», в состав которого включены памятники природы по берегам р. Немды (Постановление Правительства Кировской области от 22.09.2009 № 25/318), испытывает антропогенную нагрузку вследствие интенсивного регулируемого и нерегулируемого туристического потока, активного любительского рыболовства и использования других природных ресурсов. Именно здесь встречаются отдельные редкие виды организмов, которые в регионе больше нигде не отмечаются.

В связи с этим, цель данного исследования – разработка научно-практических рекомендаций по функциональному зонированию территории заказника «Пижемский» для решения противоречий между необходимостью ведения хозяйственной деятельности и сохранением уникальных участков, по установлению режимов особой охраны и использования выделенных зон.

Материалы и методы исследования

Заказник «Пижемский», площадью 30 847,94 га, располагается на территориях Арбажского, Котельничского, Пижанского, Тужинского и Советского районов Кировской области вдоль р. Пижмы от границы региона вниз по течению, включая правый приток – р. Немду, общей протяжённостью более 155 км при ширине от 0,5 до 4,6 км (Постановление Правительства Кировской области от 22.09.2009 № 25/318).

Территория уникальна для Кировской области: здесь на сравнительно небольшом пространстве находится большое количество

примечательных объектов, объявленных памятниками природы (ПП): «Береснятский ботанико-геологический комплекс», «Чимбулатский ботанико-геологический комплекс», включая ПП «Скальный массив «Камень» на левом берегу р. Немды и ПП «Каменная стенка у д. Тяпичи», «Зараменская пещера», «Озеро «Ширей» (Постановление Правительства Кировской области от 22.09.2009 № 25/318) (рис. 1).

Большая часть заказника (пойма р. Пижмы) расположена в геоморфологическом районе, названном поясом полесий и ополей [12]. Это плоская песчаная низина, среди которой изредка встречаются пологие и невысокие поднятия с покровными суглинками. Низины заняты преимущественно лесной растительностью. Останцовые возвышенности сложены коренными породами, почвы их богаче и лучше дренированы, чаще распаханы и освоены. Нижняя часть течения р. Пижмы и р. Немды находится в поясе водно-эрозионных возвышенностей.

Нижнее течение р. Немды входит в состав Немдинско-Вятского правобережного карста в осевой части Вятского Увала, для которого характерны небольшие подземные полости – пещеры. По правому берегу р. Немды представлены редкие формы поверхностного карста – эрозионно-карстовые останцы: утёс

«Часовой» и другие скальные выходы рифовых известняков [13].

Большая часть территории ГПЗ «Пижемский» находится в подзоне хвойно-широколиственных лесов [14], Немдинский скальный массив – в южной части подзоны южной тайги [15]. Благодаря известнякам в долине р. Немды, по сравнению с окружающей территорией, сформировался более мягкий климат и сложился флористический комплекс из таёжных, неморальных, лугово-степных и петрофитных видов, среди которых много растений, занесённых в Красную книгу Кировской области [16].

Территорию ГПЗ «Пижемский» обследовали в летний период 2025 г., проводили сплав по рр. Пижма и Немда, наземные выезды и пешие маршруты. В ходе исследования выявляли наличие антропогенного воздействия.

Изначально, руководствуясь методами и единицами измерения рекреационных нагрузок, оценки состояния территорий для лесных природных комплексов (ОСТ 56-84-85 Использование лесов в рекреационных целях. Термины и определения; ОСТ 56-100-95 Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы (утв. приказом Рослесхоза от 20 июля 1995 г. № 114)), экологического состояния территорий [17–19], анализировали степень нару-

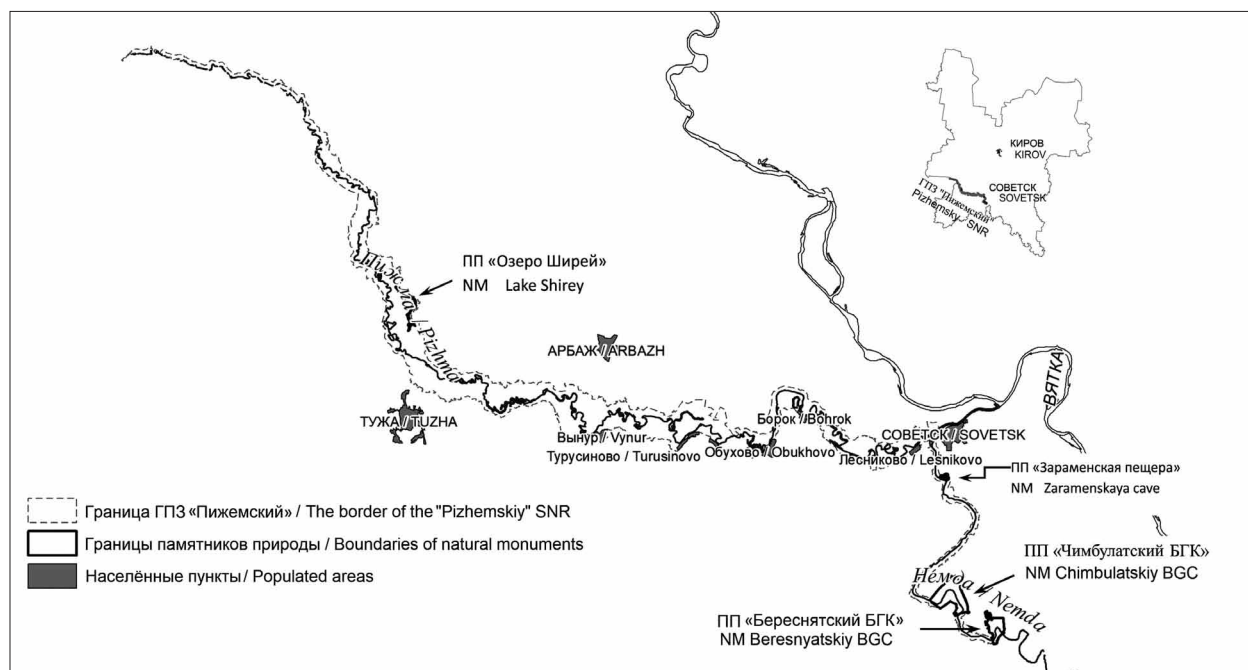


Рис. 1. Карта-схема расположения памятников природы на территории государственного природного заказника «Пижемский». Здесь и далее на рисунках: ПП – памятник природы; БГК – ботанико-геологический комплекс / **Fig. 1.** The location of natural monuments in the Pizhemskiy State Nature Reserve. Here and further in figures: NM – natural monument; BGC – botanical and geological complex

шенности природных комплексов по следующим критериям: тип сообщества (типичный для Кировской области, или нарушенный с внедрением синантропных или инвазивных видов); стадия рекреационной дигрессии; степень покрытия почвы живым напочвенным покровом; наличие редких и уязвимых видов (при ранее описанном наличии); наличие инвазивных видов; наличие «точечных» объектов антропогенного воздействия (т. е. локальные проявления влияния деятельности человека на окружающую среду, например, кострище, спиленные деревья, скопления бытового мусора и т. д.). С учётом этих критериев авторами была разработана шкала:

0 баллов (нарушенность природных комплексов отсутствует) – тип сообщества типичный для растительности региона; рекреационная дигрессия отсутствует; степень покрытия почвы живым напочвенным покровом более 75 %; редкие и уязвимые виды имеются (при ранее описанном наличии), уровень жизненности особей средний или высокий, или отсутствуют (если ранее не были отмечены); инвазивные виды отсутствуют; «точечные» объекты антропогенного воздействия отсутствуют.

1 балл (низкая) – тип сообщества типичный для растительности региона; рекреационная дигрессия до 5,0 %; степень покрытия почвы живым напочвенным покровом более 75 %; редкие и уязвимые виды имеются (при ранее описанном наличии), уровень жизненности особей средний или высокий, или отсутствуют (если ранее не были отмечены); инвазивные виды отсутствуют; «точечные» объекты антропогенного воздействия отсутствуют.

2 балла (средняя) – нарушенный тип растительности с наличием синантропных видов; рекреационная дигрессия 5,1–25,0 %; степень покрытия почвы живым напочвенным покровом составляет 50,0–74,0 %; редкие и уязвимые виды имеются (при ранее описанном наличии), уровень жизненности особей средний или низкий, или отсутствуют (если ранее не были отмечены); инвазивные виды отсутствуют; имеются «точечные» разлагаемые объекты антропогенного воздействия (бумага, окурки и др.).

3 балла (высокая) – нарушенный тип растительности с наличием инвазивных видов; рекреационная дигрессия более 25,0 %; степень покрытия почвы живым напочвенным покровом менее 50,0 %; редкие и уязвимые виды отсутствуют (при ранее описанном

наличии); имеются разлагаемые и не разлагаемые объекты (бумага, пластик, бутылки, банки, окурки и др.), кострища, повреждения древесных растений (раненые, поломанные), спиленные деревья и пни.

В соответствии с разработанной шкалой, нарушенность природных комплексов оценивали на 86 площадках, куда входили населённые пункты и их окрестности, растительные сообщества в воде и по берегам рр. Пижма и Немда (водные, прибрежно-водные, луговые, лесные, придорожные растительные ассоциации).

Параллельно с анализом степени нарушенности природных комплексов оценивали рекреационную нагрузку методом пробных площадей. Для этого были выбраны учётные площади, на которых подсчитывали единовременное количество посетителей: поляны ПП «Чимбулатский ботанико-геологический комплекс» у р. Немда (площадь 13,5 га) и «Береснятский ботанико-геологический комплекс» у р. Немда (площадь 5,53 га). На эти территории приходится основной поток отдыхающих, рядом с ними (или входящими в исследуемую зону) расположены места уникальных ландшафтов и произрастания редких видов растений. Рекреационную нагрузку оценивали в дневное время выходных дней с конца июля до середины августа.

По результатам комплексной оценки нарушенности природных комплексов и рекреационной нагрузки делали заключение об интенсивности антропогенной нагрузки.

Кроме натурных исследований, проводили анализ разновременных спутниковых снимков с интернет-ресурсов Google Earth PRO и SAS.Планета.

Результаты и обсуждение

Оценка степени нарушенности территории по комплексу критериев показала следующее: на 37,2 % обследованных участках природные комплексы не нарушены (0 баллов); на 31,4 % – имеют среднюю степень нарушенности (2 балла); на 27,9 % – низкую степень (1 балл); на 3,5 % – высокую (3 балла). В качестве «точечных» антропогенных объектов установлены кострища, бытовой мусор (пакеты, бутылки и др.), ямы с мусором.

К негативному фактору воздействия на природу, особенно на прибрежно-водные и водные сообщества, относится животноводческий комплекс в с. Обухово, который расположен в водоохранной зоне, на рас-

стоянии 50–70 м от уреза воды р. Пижмы. К нарушению природных комплексов приводит и асфальтобетонный завод дорожного управления, занимающий 30 % территории ПП «Зараменская пещера». Массовый характер носят и организуемые тренировки по скалолазанию на отвесных стенках массива «Камень».

Интенсивность антропогенного воздействия возрастает в местах расположения основных посещаемых природных объектов и комплексов, а также на регулярно используемых площадках кемпинговой рекреации по берегам рр. Немда и Пижма.

Тип сообществ на значительной доле площадей заказника характерен для растительности региона. Нарушенным он становится при внедрении инвазивных видов растений: *Acer negundo* L., *Lupinus polyphyllus* Lindl., *Heracleum sosnowskyi* Manden., *Echinocystis lobata* (Michx.) Torr. & A. Gray, *Xanthium strumarium* L. Это наблюдается в местах массового посещения территорий отдыхающими, по тропам-сходам к рр. Пижма и Немда, вблизи населённых пунктов и на месте заброшенных деревень.

Процент дигрессии растительного покрова варьирует от 0 до 60 %. Максимальные значения отмечены в пределах ПП «Береснятский ботанико-геологический комплекс» и «Чимбулатский ботанико-геологический комплекс», а также на месте обработанных земель (вспаханное поле) в окрестностях д. Верхопижемье, которые находятся у водоохранной зоны.

Живой напочвенный покров отсутствует на месте вспаханных полей; в природных сообществах проективное покрытие варьирует от 3 до 98 %. Низкое значение не всегда обусловлено интенсивным вытаптыванием отдыхающими, иногда и особенностями растительного сообщества (прежде всего лесного, или прибрежного в местах песчаных наносов).

Редкие виды выявлены в пределах ПП «Береснятский ботанико-геологический комплекс» и «Чимбулатский ботанико-геологический комплекс», где они и отмечались ранее.

Территория ГПЗ «Пижемский» отличается высокой живописностью и историко-научной ценностью, поэтому заказник пользуется широкой популярностью в рекреационно-просветительских целях. Расчёт рекреационной нагрузки на обследованные территории показал, что в выходные дни в солнечную тёплую погоду нагрузка в пределах и ниже нормы: от 0,02 до 0,4 посетителей на 1 га. Рекреационная нагрузка определена и на водные

объекты: оз. Ширей и рр. Пижма и Немда. На оз. Ширей: при солнечной и тёплой (+25 °С) погоде одновременно находились 4 человека (рыбаки), 2 машины, 2 лодки. В выходные дни количество отдыхающих доходит до 10.

По водотокам р. Пижмы и приустьевой части р. Немды при солнечной, тёплой погоде, без осадков, на протяжении всего дня отмечено: 101 человек, 3 палатки, 83 лодки (с мотором, резиновые и деревянные), на берегу – 20 единиц техники (автомобили, мотоциклы). С учётом протяжённости маршрута 157,5 км, на 1 км приходится 0,6 чел. Сосредоточение отдыхающих и лодок наблюдается у населённых пунктов: Покста, Набережный, Вынур, Турусиново, Борок, Обухово, Лесниково, Верхопижемье, Чуманево, у моста через р. Немда у д. Пирогово (на г. Советск).

Проведённый анализ наблюдений подтвердил, что основными видами рекреации являются повседневная и лесная экскурсия, а также кемпинговая рекреация на отдельных участках. Экскурсии носят преимущественно самостоятельный характер, либо проводятся гидами-индивидуалами.

В настоящее время последствиями стихийной рекреации являются деградация почвенного покрова, древостоя, подлеска, расширение дорожно-тропиночной сети, развитие эрозионных процессов, возникновение стихийных свалок и кострищ в наиболее уязвимых частях территории комплексов. Крупные несанкционированные свалки не выявлены в ходе обследования, однако дисперсный мусор отмечен у отдельных туристических стоянок на берегах р. Немды. Установлено, что под воздействием рекреации на неорганизованных тропах и грунтовых дорогах почва изменяется, отмечено нарушение живого почвенного покрова и подстилки в 60,5 % обследованных природных сообществах. Наибольшие изменения отмечены в верхнем 0–5 см слое и на уплотнённых автотранспортом дорогах по берегам р. Немды.

Обобщая результаты оценки нарушенности природных комплексов и рекреационной нагрузки, полученные в ходе полевого обследования и анализа, заключаем: интенсивность антропогенного воздействия в местах расположения основных посещаемых природных объектов и комплексов, а также на регулярно используемых площадках кемпинговой рекреации на берегах р. Немды и в двух местах по берегам р. Пижмы (с. Обухово и д. Верхопижемье) можно оценить как высокую. На остальных исследованных участках берега

в границах водоохранной зоны воздействие носит нерегулярный и умеренно интенсивный характер. В приводораздельной части долины р. Немды и на водоразделах рекреационная активность заметно снижается и выражается, в основном, в транзитном проезде автотранспорта к основным достопримечательностям ООПТ. Заказник «Пижемский» имеет особо ценное значение для сохранения водных биоценозов и уникальных природных объектов в бассейне среднего и нижнего течения р. Вятки, сохранения и воспроизводства редких и исчезающих видов растений и животных. По данным литературы и результатам собственных обследований природных сообществ выявлено, что в немдинской части заказника, на территориях ПП, встречаются виды, занесённые в Красную книгу Российской Федерации [20] (*Cypripedium calceolus* L., *Calypso bulbosa* (L.) Oakes, *Orchis militaris* L.) и Красную книгу Кировской области [16]: *Asplenium ruta-muraria* L., *Gymnocarpium robertianum* (Hoffm.) Newm., *Euphorbia subtilis* (Prokh.) Prokh., *Potentilla longifolia* Willd. ex Schlecht. (*Potentilla pensylvanica* L.), *Draba podolica* (Besser) Rupr. (*Schivereckia podolica* (Bess.) Andr. ex DC.) и др. Для пяти видов растений берега р. Немды являются единственным известным в Кировской области местом произрастания: *Draba podolica*, *Euphorbia subtilis*, *Potentilla longifolia*, *Asplenium ruta-muraria*, *Delphinium cuneatum* Steven ex DC.

В отличие от немдинского участка, в природных сообществах вдоль р. Пижмы ГПЗ «Пижемский» редкие и исчезающие виды растений не выявлены.

На территориях ПП вдоль р. Немды встречается 23 вида наземных позвоночных животных, занесённых в Красную книгу РФ [21] и Красную книгу Кировской области [16], что составляет 43 % от общего числа редких видов. Шесть видов: *Bufo viridis* (Laurenti, 1768), *Chlidonias niger* (Linnaeus, 1758), *Chlidonias leucopterus* (Temminck, 1815), *Myotis dasycneme* (Boie, 1825), *Myotis brandtii* (Eversmann, 1845), *Plecotus auritus* (Linnaeus, 1758) – являются уязвимыми, нуждающимися в контроле за состоянием популяций.

Функциональное зонирование ООПТ – это разделение территории на участки с различным назначением и соответствующими ему режимами использования. На основе всестороннего изучения и анализа опубликованных и фондовых материалов, нормативных правовых документов, данных Росреестра, разновременных спутниковых снимков из

интернет-ресурсов Google Earth PRO и SAS. Планета, а также результатов собственных натурных обследований в пределах заказника предлагаем выделить три функциональные зоны: 1) зону рекреации; 2) зону хозяйственного использования; 3) зону особой охраны.

Зону особой охраны предлагаем создать на территории ПП «Каменная стенка у д. Тяпичи», расположенной в границах ПП «Чимбулатский ботанико-географический комплекс», в юго-восточной его части (рис. 2, см. вставку IV). Здесь на скальных останцах известняков и прилегающих осыпях в течение многих лет выявляются редкие виды растений, занесённых в Красные книги России и области [16, 20]. Данная зона характеризуется ограниченной площадью мест обитания редких растений по сравнению с остальной частью заказника. Большинство видов, обитающих в выделяемой зоне, остро реагируют на антропогенное воздействие. Допускается проведение научных исследований, просветительных, воспитательных, эстетических мероприятий при наличии соответствующих разрешений специально уполномоченных государственных органов в области охраны окружающей среды. Для сохранения и увеличения численности редких и исчезающих видов рекомендуется при посещении данной зоны ограничить виды деятельности, противоречащие разрешённым. В зону особой охраны предлагаем включить весь скальный массив ПП «Каменная стенка у д. Тяпичи» и прилегающую к нему территорию выше (рис. 2). Общая площадь составит 2,3 га.

Основными критериями включения территории в зону особой охраны послужили типичность (сохранность) природного комплекса, её природоохранная уникальность и возможность соблюдения установленного режима.

На территории ГПЗ «Пижемский» предлагаем установить **функциональную зону рекреации** только вдоль р. Немды на двух участках, условно названных «Береснятский» и «Чимбулатский». При этом ограничивающими факторами в установлении границ зоны рекреации принимали то, что она не может располагаться на землях промышленности, землях сельскохозяйственного назначения и землях населённых пунктов. При этом учитывалось наличие подъездных дорог, удобный для организации рекреационной деятельности рельеф, востребованность территории жителями и гостями Кировской области. Рекреационная деятельность здесь относится к категориям: туристическая, сезонная (летом)

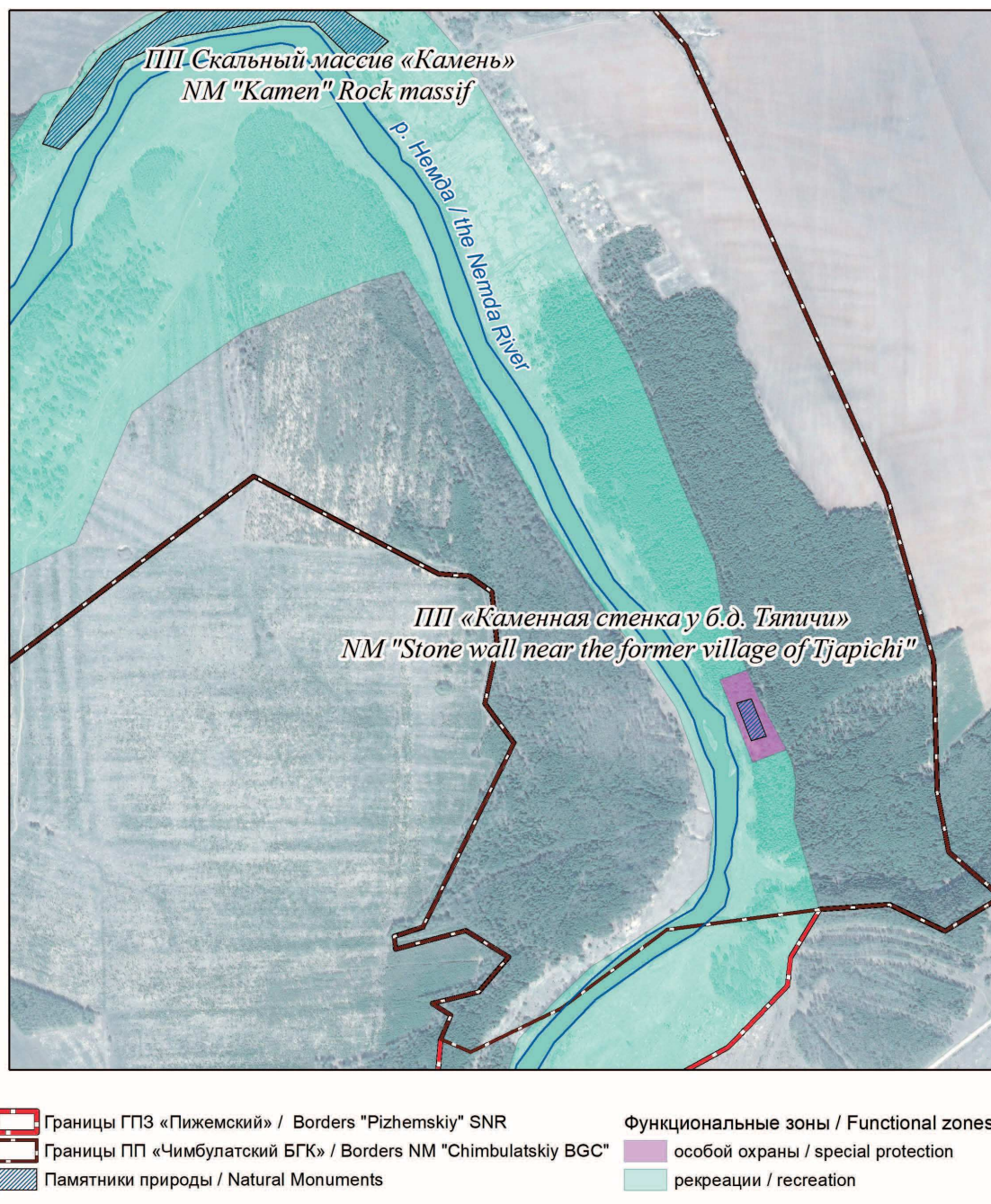


Рис. 2. Карта-схема расположения памятника природы «Каменная стенка у д. Тяпичи» и одноимённой функциональной зоны особой охраны / **Fig. 2.** The location of the natural monument "Stone Wall near the Tyapichi" and the same name functional zone of special protection

Е. А. Домнина, С. В. Шабалкина, О. Н. Пересторонина, А. С. Тимонов
 «Научно-практические подходы к функциональному зонированию
 государственного природного заказника «Пижемский»
 (Кировская область)». С. 58

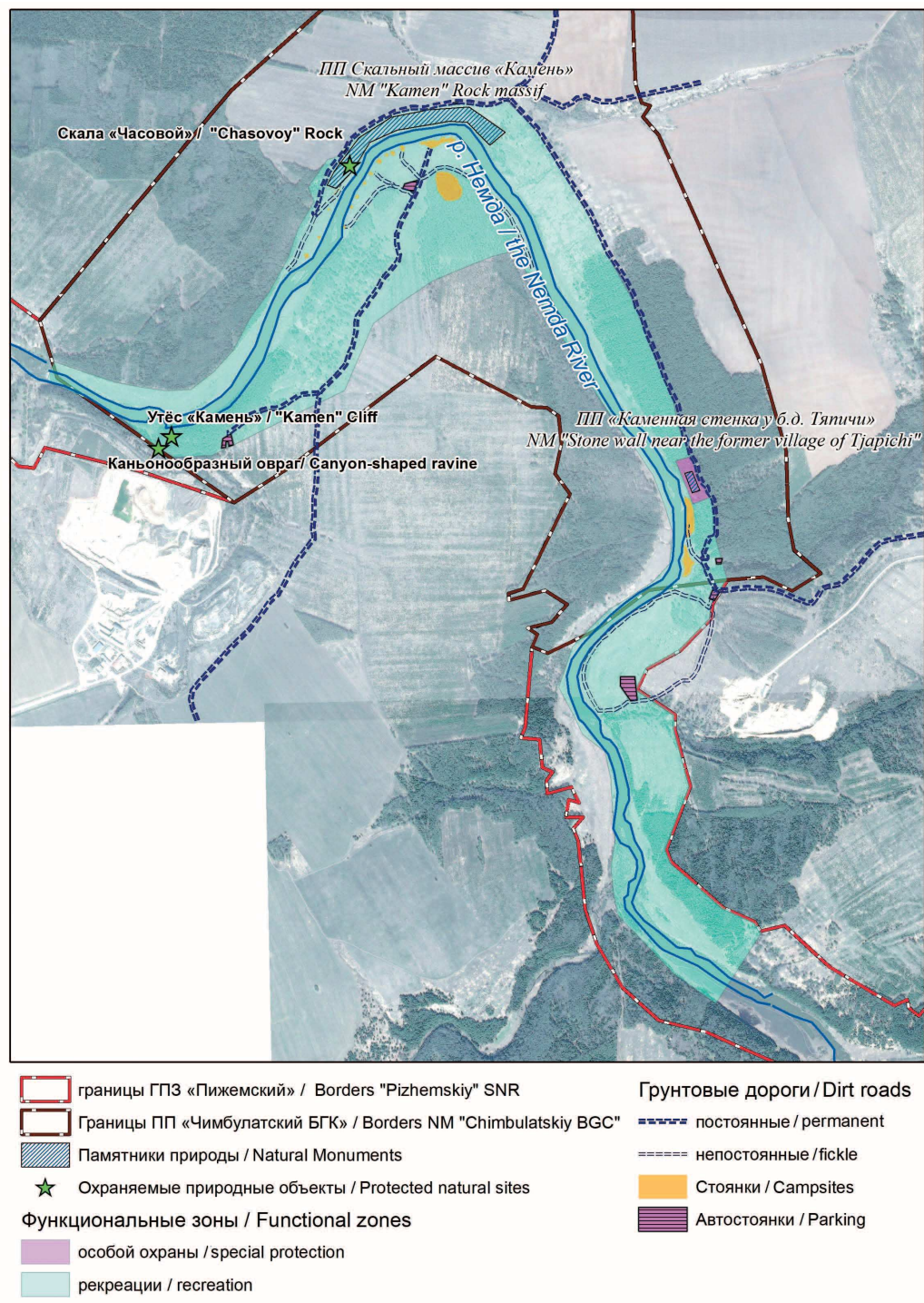


Рис. 3. Карта-схема расположения участка «Чимбулатский» функциональной зоны рекреации
 Fig. 3. The location of the Chimbulatskiy section of the recreational zone

Е. А. Домнина, С. В. Шабалкина, О. Н. Пересторонина, А. С. Тимонов
«Научно-практические подходы к функциональному зонированию
государственного природного заказника «Пижемский»
(Кировская область)». С. 58

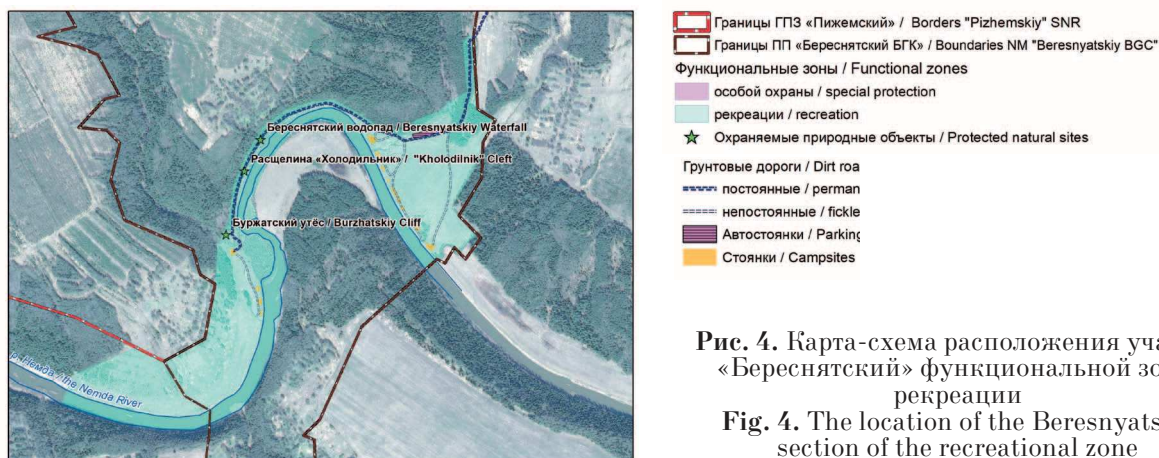


Рис. 4. Карта-схема расположения участка «Береснятский» функциональной зоны рекреации
Fig. 4. The location of the Beresnyatskiy section of the recreational zone

И. Г. Широких, Н. А. Боков, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина
«Профили антибиотикорезистентности стрептомицетов
из разных почв Вятского Прикамья». С. 183

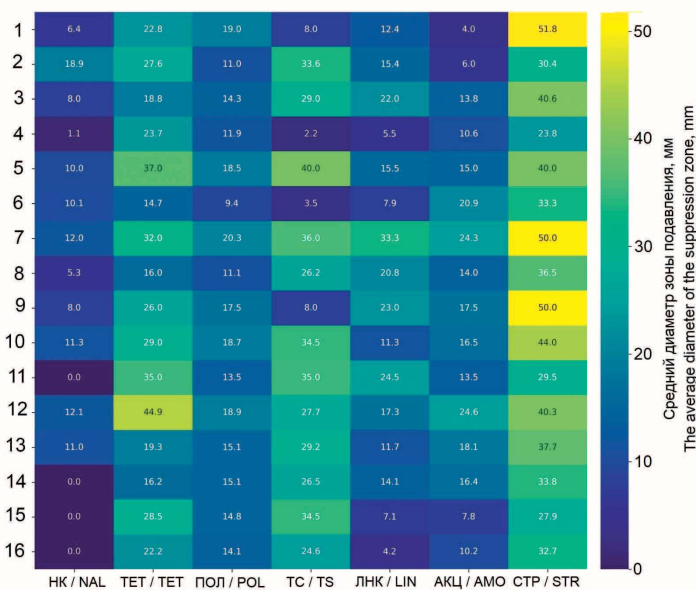


Рис. 1. Профили антибиотической устойчивости стрептомицетов из почв природных и антропогенно трансформированных экосистем разных районов Кировской области: 1 – Советский, 2, 3 – Мурашинский*, 4 – Нолинский, 5 – Советский, 6 – Котельничский, 7 – Советский, 8 – Мурашинский, 9, 10 – Советский, 11 – Кирово-Чепецкий*, 12, 13 – Нагорский, 14, 15, 16 – Мурашинский*. Звёздочками отмечены антропогенно трансформированные экосистемы. *Примечание к рисункам 1–4: НК – налидиксовая кислота, TET – тетрациклин, ПОЛ – полимиксин, ТС – триметоприм/сульфаметоксазол, ЛНК – линкомицин, АКЦ – амоксициллин, СТР – стрептомицин*

Fig. 1. Profiles of antibiotic resistance of streptomycetes from the soils of natural and anthropogenic transformed ecosystems in different districts of the Kirov Oblast: 1 – Sovetskiy, 2, 3 – Murashinskiy*, 4 – Nolinskiy, 5 – Sovetskiy, 6 – Kotelnichskiy, 7 – Sovetskiy, 8 – Murashinskiy, 9, 10 – Sovetskiy, 11 – Kirovo-Chepetskiy*, 12, 13 – Nagorskiy, 14, 15, 16 – Murashinskiy*. The asterisks indicate anthropogenic transformed ecosystems. *Notes for Figures 1–4: NAL – Nalidixic acid, TET – tetracycline, POL – polymyxin, TS – trimethoprim/sulfamethoxazole, LIN – lincomycin, AMO – amoxicillin, STR – streptomycin*

при благоприятных погодных условиях (отсутствие длительных дождей), т. к. подъезд к участкам по грунтовым дорогам в это время практически невозможен.

Рекомендуемый участок зоны рекреации «Чимбулатский» расположен большей частью на территории ПП «Чимбулатский ботанико-геологический комплекс», в юго-восточной части выходит за его пределы. Он включает территории лево- и правобережья р. Немды и протягивается полосой шириной от 250–300 до 850 м. На схеме (рис. 3, см. цв. вкладку V) показаны ПП в составе ПП «Чимбулатский ботанико-геологический комплекс», охраняемые природные объекты, стоянки и автостоянки, дороги. Общая площадь участка – 389,4 га.

Рекомендуемый участок зоны рекреации «Береснятский» полностью располагается в границах ПП «Береснятский ботанико-геологический комплекс» от юго-восточной его границы по левобережной береговой линии р. Немды, включая реку (рис. 4, см. цв. вкладку VI). На схеме показаны охраняемые природные объекты («Береснятский водопад», «Расщелина «Холодильник» и «Буржатский утёс»), оформившиеся за много лет и обустроенные места стоянок с кострищами; постоянные и непостоянные дороги; границы водоохранной зоны и рекомендуемое место расположения автостоянки для посетителей. Всего на этом участке при натурных обследованиях установлено 13 стоянок суммарной площадью около 0,7 га. Общая площадь участка – 83,9 га.

Таким образом, зона рекреации выделена в местах расположения наиболее ценных в эколого-просветительском отношении и популярных у посетителей заказника объектов туристического интереса. Однако, в пределах этой зоны также встречаются уникальные объекты и редкие виды организмов, поэтому для реализации природоохранной функции ГПЗ «Пижемский» целесообразно организовать ограниченный доступ к отвесным и крутым участкам в виде ограждений и оборудованных троп.

Кроме рекреации и сопутствующих ей способов использования территории к разрешённым видам деятельности предлагаем отнести: выборочные рубки при проведении санитарно-оздоровительных мероприятий в лесах; сенокошение для обеспечения функционирования зоны рекреации; заготовка гражданами пищевых лесных ресурсов и сбор ими лекарственных растений для собственных нужд; любительское и спортивное рыболовство.

К функциональной зоне хозяйственного использования для целей ГПЗ «Пижемский» рекомендуем отнести территорию, на которой не располагаются рекомендованные участки функциональных зон рекреации (473,3 га) и особой охраны (2,3 га), также земли промышленности (23,63 га) и сельскохозяйственные земли (449,3 га). Общая площадь составит 29 899,4 га. В пределах этой зоны допускается проведение плановых биотехнических мероприятий, выпас сельскохозяйственных животных, сенокошение, пользование водным объектом при наличии разрешительных документов, предусмотренных действующим законодательством, иные виды хозяйственной деятельности, не противоречащие целям создания заказника. В то же время следует обратить внимание на то, что в функциональной зоне хозяйственного использования должны обязательно соблюдаться требования водного законодательства Российской Федерации в части режима пользования территориями водоохранных зон и прибрежных защитных полос водных объектов.

Заключение

Результаты исследования показали, что территория ГПЗ «Пижемский» наряду с природоохранной ценностью имеет многоцелевое значение и использование. В связи с этим на территории заказника предложено выделить три функциональные зоны. В зону особой охраны целесообразно включить весь скальный массив ПП «Каменная стенка у д. Тяпичи» и прилегающую к нему территорию (площадь 2,3 га). Эта зона характеризуется ограниченной площадью обитания редких растений по сравнению с остальной частью заказника.

Функциональную зону рекреации следует выделить в местах расположения наиболее ценных в эколого-просветительском отношении и популярных у посетителей заказника объектов туристического интереса вдоль р. Немды на двух участках, условно названных «Береснятский» (площадь участка – 83,9 га) и «Чимбулатский» (площадь участка – 389,4 га.).

К функциональной зоне хозяйственного использования, наибольшей по площади (29 899,4 га), целесообразно отнести, в основном, прилегающую к р. Пижме территорию, которая хозяйственно освоена и используется населением. На ней не выявлены охраняемые растения и животные.

Разработанная схема функционального зонирования позволит сохранить благоприятные условия для природных комплексов и ландшафтов, существования популяций редких и нуждающихся в охране видов, рационально вести природопользование. Подходы, принятые в данной работе, могут быть использованы при зонировании территории других заказников.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 125021402208-5).

Литература

1. Имыкшенова Э.Б. Функциональное зонирование особо охраняемых природных территорий // Вестник Бурятского государственного университета. 2007. № 3. С. 21–24.
2. Perestoronina O., Shabalkina S. Preserving complex pine forests in the taiga zone in conditions of science-based and sustainable forest management // BIO Web of Conferences. 2023. V. 71. Article No. 01120. doi: 10.1051/bioconf/20237101120
3. Пересторонина О.Н., Шабалкина С.В., Домнина Е.А. Мониторинг охраняемых видов на территории государственного природного заказника «Бушковский лес» // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 1. С. 194–201. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-194-201
4. Денисова Н.В. Оценка антропогенной нагрузки на территории Бештаугорского заказника // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 1. С. 7–26. doi: 10.37493/2308-4758.2023.1.1
5. Стоящева Н.В., Рыбкина И.Д., Резников В.Ф., Губарев М.С. Заказник «Хабарский» как ключевой объект системы особо охраняемых природных территорий бассейна реки Бурлы // Известия Русского географического общества. 2019. Т. 151. № 1. С. 61–71. doi: 10.31857/S0869-6071151161-71
6. Селезнева Е.В., Ротанова И.Н. Функциональное зонирование заказника «Лифляндский» в Алтайском крае: правовое обеспечение и научно-практические подходы // Успехи современного естествознания. 2023. № 10. С. 49–56. doi: 10.17513/use.38113
7. Симакова Т.В. Анализ организации использования земель особо охраняемых природных территорий Ишимского района Тюменской области // International Agricultural Journal. 2024. Т. 67. № 2. Статья 18. doi: 10.55186/25876740_2024_8_2_18
8. Симакова Т.В., Евтушкова Е.П., Скипин Л.Н. Организация использования земель заказника «Рафайловский» в системе природопользования Тюменской области // Агропродовольственная политика России. 2017. № 8 (68). С. 6–11.

9. Литвиненко Н.В., Конушина Е.Ю. Анализ организации использования земель ООПТ Викуловского района // Московский экономический журнал. 2022. Т. 7. № 10. Статья 2. doi: 10.55186/2413046X_2022_7_10_573
10. Лопина Е.М., Корнилов А.Г., Юдина Ю.В., Павлюк Я.В. Туристско-рекреационный потенциал Губкинского заказника и его роль в устойчивом развитии региона // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. С. 68–74. doi: 10.17513/use.37952
11. Сибиркина А.Р., Трофимова Л.В., Лушников Д.С. Функциональное зонирование Санарского государственного природного комплексного заказника Челябинской области методом дешифрирования аэроснимков // Лесной вестник. 2021. Т. 25. № 6. С. 79–88. doi: 10.18698/2542-1468-2021-6-79-88
12. Кузницын М.А. Геоморфологические районы // Энциклопедия Земли Вятской. Т. 7. Природа. Киров: Областная писательская организация, 1997. С. 137–141.
13. Исупова Е.М. Рельеф // Энциклопедия Земли Вятской. Т. 7. Природа. Киров: Областная писательская организация, 1997. С. 112–137.
14. Зубарева Л.А. Растительный покров // Энциклопедия Земли Вятской. Т. 7. Природа. Киров: Областная писательская организация, 1997. С. 343–362.
15. Геоботаническое районирование Нечерноземья Европейской части РСФСР. Л.: Наука, 1989. 64 с.
16. Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы. Изд. 2-е / под ред. О.Г. Барановой, Е.П. Лачохи, В.М. Рябова, В.Н. Сотникова, Е.М. Тарасовой, Л.Г. Целищевой. Киров: ООО «Кировская областная типография», 2014. 336 с.
17. Система оценки и нормирования антропогенной нагрузки для формирования экологически сбалансированных агроландшафтов. Коллективная монография / под общ. ред. Н.П. Масютенко. Курск: ФГБНУ ВНИИ-ЗиЗПЭ, 2014. 187 с.
18. Стишов М.С., Троицкая Н.И. Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях. Методические рекомендации. М., 2025. 140 с.
19. Хаустов А.П., Редина М.М. Нормирование антропогенных воздействий и оценки природоёмкости территорий. М.: РУДН, 2008. 282 с.
20. Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы / отв. редактор: д-р биол. наук Д.В. Гельман. 2-е офиц. изд. М.: ВНИИ «Экология», 2024. 944 с.
21. Красная книга Российской Федерации, том «Животные». 2-ое изд. М.: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2021. 1128 с.

References

1. Imykshenova E.B. Functional zoning of specially protected natural areas // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. 2007. No. 3. P. 21–24 (in Russian).
2. Perestoronina O., Shabalkina S. Preserving complex pine forests in the taiga zone in conditions of science-

based and sustainable forest management // BIO Web of Conferences. 2023. V. 71. Article No. 01120. doi: 10.1051/bioconf/20237101120

3. Perestoronina O.N., Shabalkina S.V., Domnina E.A. Monitoring of protected species on the territory of Bushkovskiy forest State Nature Reserve // Theoretical and Applied Ecology. 2025. No. 1. P. 194–201 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2024-4-194-201

4. Denisova N.V. Assessment of anthropogenic load on the territory of the Beshtaugor reserve // Nauka. Innovatsii. Tekhnologii. 2023. No. 1. P. 7–26 (in Russian). doi: 10.37493/2308-4758.2023.1.1

5. Stoyashcheva N.V., Rybkina I.D., Reznikov V.F., Gubarev M.S. Khabarsky reserve as the main object of the nature protected areas system in the Burla River basin // Bulletin of the Russian Geographical Society. 2019. V. 151. No. 1. P. 61–71 (in Russian). doi: 10.31857/S0869-6071151161-71

6. Selezneva E.V., Rotanova I.N. Functional zoning of the reserve “Liflyandsky” in the Altai krai: legal support and scientific and practical approaches // Advances in current natural sciences. 2023. No. 10. P. 49–56 (in Russian). doi: 10.17513/use.38113

7. Simakova T.V. Analysis of the organization of use of land of specially protected natural areas of the Ishim District of the Tyumen Region // International Agricultural Journal. 2024. V. 67. No. 2. Article No. 18 (in Russian). doi: 10.55186/25876740_2024_8_2_18

8. Simakova T.V., Evtushkova E.P., Skipin L.N. Organization of land use of the nature reserve “Rafaylovskiy” in the nature management system of the Tyumen region // Agroprodovol'stvennaya politika Rossii. 2017. No. 8 (68). P. 6–11 (in Russian).

9. Litvinenko N.V., Konushina E.Yu. Analysis of the organization of the use of SPNA land in the Vikulovsky District // Moscow Economic Journal. 2022. V. 7. No. 10. Article No. 2 (in Russian). doi: 10.55186\2413046X_2022_7_10_573

10. Lopina E.M., Kornilov A.G., Yudina Yu.V., Pavlyuk Y.V. Tourist and recreation potential of the Gubkinsky reserve and its role in the sustainable development of the region // Advances in Current Natural Sciences. 2022. No. 12. P. 68–74 (in Russian). doi: 10.17513/use.37952

11. Sibirskina A.R., Trofimova L.V., Lushnikov D.S. Functional zoning of Sanarsky state nature complex reserve in Chelyabinsk region by air photo interpretation // Forestry Bulletin. 2021. V. 25. No. 6. P. 79–88 (in Russian). doi: 10.18698/2542-1468-2021-6-79-88

12. Kuznitsyn M.A. Geomorphological regions // Encyclopedia of the Vyatka Land. V. 7. Nature. Kirov: Oblastnaya pisatel'skaya organizaciya, 1997. P. 137–141 (in Russian).

13. Isupova E.M. Relief // Encyclopedia of the Vyatka Land. V. 7. Nature. Kirov: Oblastnaya pisatel'skaya organizaciya, 1997. P. 112–137 (in Russian).

14. Zubareva L.A. Vegetation cover // Encyclopedia of the Vyatka Land. V. 7. Nature. Kirov: Oblastnaya pisatel'skaya organizaciya, 1997. P. 343–362 (in Russian).

15. Geobotanical zoning of the Non-Black Earth Region of the European part of the RSFSR. Leningrad: Nauka, 1989. 64 p. (in Russian).

16. Red Book of the Kirov region: animals, plants, mushrooms / Eds. O.G. Baranova, E.P. Lachokha, V.M. Ryabov, V.N. Sotnikov, E.M. Tarasova, L.G. Tselishcheva. Kirov: OOO “Kirovskaya oblastnaya tipografiya”, 2014. 336 p. (in Russian).

17. A system for assessing and standardizing anthropogenic load for the formation of ecologically balanced agricultural landscapes. Collective monograph / Ed. N.P. Masyutenko. Kursk: Federal State Budgetary Scientific Institution “All-Russian Scientific Research Institute of Agriculture and Soil Protection from Erosion”, 2014. 187 p. (in Russian).

18. Stishov M.S., Troickaya N.I. Organization of environmental monitoring in specially protected natural areas. Methodological recommendations. Moskva, 2025. 140 p. (in Russian).

19. Standardization of anthropogenic impacts and assessment of natural capacity of territories. Moskva: RUDN, 2008. 282 p. (in Russian).

20. Red Data Book of the Russian Federation. Plants and Fungi / Ed. D.V. Geltman. 2nd official ed. Moskva: VNII “Ekologiya”, 2024. 944 p. (in Russian).

21. Red Data Book of the Russian Federation, Vol. “Animals”. 2nd ed. Moskva: FGBU “VNII Ekologiya”, 2021. 1128 p. (in Russian).

Финансовые аспекты и доходы бюджетов в природоохранную деятельность РФ за период 2015–2024 гг.

© 2026. А. С. Петрова¹, заместитель директора Департамента международного сотрудничества в сфере охраны окружающей среды и экологической безопасности,

А. С. Саидова², к. полит. н., в. н. с.,

Е. В. Шмыкова², зав. лабораторией,

И. Д. Ардзинба³, магистрант,

¹Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации,
125993, Россия, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 4/6,

²Всероссийский научно-исследовательский институт охраны окружающей среды,
117628, Россия, г. Москва, 36-й км МКАД, двлд. 1, стр. 4,

³Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации,
125167, Россия, г. Москва, Ленинградский пр-кт, д. 49/2,

e-mail: a.saidova@vniiecolology.ru

В статье анализируются доходы бюджетов от природопользования в Российской Федерации за период 2015–2024 гг. Рассматриваются теоретические основы финансовых механизмов в природопользовании, включая плату за использование природных ресурсов, компенсационные платежи и стимулирование экологически ответственного поведения. Проанализирована динамика и структура доходов федерального и консолидированного бюджетов от различных видов природопользования (водные, лесные ресурсы, недра, экологические платежи, штрафы). Особое внимание уделено изменениям в структуре доходов, увеличению поступлений от продажи прав на добычу водных биологических ресурсов и влиянию вывозных таможенных пошлин на сырую нефть и природный газ. Исследована динамика инвестиций в основной капитал, направленных на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов, с акцентом на изменение приоритетов в финансировании различных направлений, таких как очистка сточных вод, охрана атмосферного воздуха и экологическая реабилитация земель. Подчеркивается необходимость дальнейшего анализа эффективности инвестиций в природоохранную деятельность для достижения конкретных экологических результатов и реализации концепции устойчивого развития.

Ключевые слова: доходы бюджетов, природопользование, охрана окружающей среды, экологические платежи, налоги, природные ресурсы, инвестиции, таможенные пошлины.

Financial aspects and budget revenues for environmental protection activities in the Russian Federation for 2015–2024

© 2026. A. S. Petrova¹ ORCID: 0009-0006-5646-8915, A. S. Saidova² ORCID: 0009-0002-2206-4796

E. V. Shmykova² ORCID: 0009-0007-9055-9359, I. D. Ardzinba³ ORCID: 0009-0001-1498-6347

¹Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation,
4/6, Bolshaya Gruzinskaya St., Moscow, Russia, 125993,

²All-Russian Research Institute for Environmental Protection,
4 p., 1 dvld., 36-th km MKAD, Moscow, Russia, 117628,

³Financial University under the Government of the Russian Federation,
49/2, Leningradskiy Ave., Moscow, Russia, 125167,

e-mail: a.saidova@vniiecolology.ru

The article presents a comprehensive analysis of budget revenues generated from natural resource use in the Russian Federation over the period from 2015 to 2024. The primary aim of the study is to evaluate the effectiveness of financial mechanisms in the sphere of natural resource management, including resource use fees, compensation payments, and incentives for environmentally responsible behavior. The research focuses on identifying key trends in the formation and distribution of revenues at both the federal and consolidated budget levels, as well as assessing the impact of regula-

tory and market changes on the structure of these revenues. The study examines the dynamics and structure of budget incomes derived from various types of natural resource utilization, such as water resources, forestry, subsoil use, environmental payments, and fines. Special attention is given to the significant increase in revenues from the sale of rights for the extraction of aquatic biological resources and the influence of export customs duties on crude oil and natural gas. The analysis reveals shifts in the revenue structure, reflecting both policy adjustments and global market fluctuations. The article investigates investment trends in fixed capital aimed at environmental protection and sustainable resource management. It highlights changes in funding priorities across key areas, including wastewater treatment, air quality protection, and ecological land rehabilitation. The findings underscore the importance of aligning investment strategies with long-term environmental goals. The results demonstrate that while revenues from natural resource use remain a crucial component of the Russian budget, there is a growing need to enhance the efficiency of investments in environmental activities. The study concludes with recommendations for further research into the effectiveness of financial mechanisms to achieve tangible environmental outcomes and support the implementation of sustainable development principles. The insights provided are valuable for policymakers, economists, and environmental managers seeking to optimize fiscal and ecological policies in Russia.

Keywords: budget revenues, nature management, environmental protection, environmental payments, taxes, natural resources, investments, customs duties.

Доходы бюджетов от природопользования являются важным инструментом финансирования природоохранной деятельности и стимулирования рационального использования природных ресурсов. В период 2015–2024 гг. структура и динамика этих доходов претерпели определённые изменения, отражающие как экономическую ситуацию, так и изменения в законодательстве. Теоретические основы финансовых механизмов в природопользовании подробно рассмотрены в работе [1].

Целью данной работы является проведение комплексного анализа доходов бюджетов от природопользования за период 2015–2024 гг. и определение их эффективности как механизма финансирования природоохранной деятельности, а также выявления факторов, влияющих на их динамику и структуру.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования выступают финансовые потоки, формирующие доходы федерального и консолидированного бюджетов Российской Федерации (РФ) от различных видов природопользования, а также инвестиции в основной капитал, направленные на охрану окружающей среды (ОС). Предметом исследования являются закономерности формирования, распределения и изменения структуры указанных доходов и инвестиций в анализируемом периоде.

Информационной базой для анализа послужили официальные данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат), Министерства финансов РФ, а также нормативно-правовые акты, регулирующие вопросы платы за использование природных ресурсов, экологических платежей и инвестиционной деятельности. В работе применялись общенаучные методы исследования: систем-

ный анализ для оценки взаимосвязей между экономическими и экологическими показателями, статистический анализ для выявления динамики и структуры доходов, а также сравнительный анализ для сопоставления показателей по различным видам природопользования (водные ресурсы, лесные ресурсы, недра) и направлениям финансирования.

Теоретически, доходы бюджетов от природопользования можно рассматривать как плату за использование природных ресурсов, компенсацию за негативное воздействие на ОС и инструмент стимулирования экологически ответственного поведения. В экономической теории плата за использование ресурсов способствует их более эффективному распределению и предотвращает их истощение. Компенсационные платежи направлены на возмещение ущерба, нанесённого ОС, и финансирование мероприятий по её восстановлению. Подходы к оценке ущерба ОС рассматриваются в трудах [2].

В период 2015–2024 гг. основными источниками доходов бюджетов от природопользования оставались платежи за пользование природными ресурсами (водными, лесными, земельными, недрами и др.), экологические платежи (за выбросы и сбросы загрязняющих веществ, размещение отходов) и штрафы за нарушение природоохранного законодательства. Однако, соотношение этих источников могло меняться в зависимости от экономической конъюнктуры, изменений в налоговом и экологическом законодательстве, а также от эффективности контрольно-надзорной деятельности [3].

Анализ динамики и структуры доходов бюджетов от природопользования за период 2015–2024 гг. позволяет оценить эффективность существующей системы финансирования природоохранной деятельности и выявить

направления для её совершенствования. Важно учитывать, что доходы от природопользования должны не только обеспечивать финансирование природоохранных мероприятий, но и стимулировать хозяйствующие субъекты к снижению негативного воздействия на ОС и рациональному использованию природных ресурсов [4].

Результаты и обсуждение

Анализ динамики доходов бюджетов от природопользования за 2015–2024 гг. выявил ряд значимых тенденций. Несмотря на общую зависимость бюджетной системы от сырьевого сектора, структура поступлений претерпела заметные изменения. Наблюдался рост доли доходов от продажи прав на добычу водных биологических ресурсов (ВБР), что свидетельствует о совершенствовании механизмов распределения квот и повышении эффективности рыбохозяйственного комплекса.

В то же время ключевое влияние на формирование доходов оказывали вывозные таможенные пошлины на сырую нефть и природный газ. Их динамика напрямую коррелировала с колебаниями мировых цен на энергоносители и с изменениями в налоговом законодательстве. Анализ структуры экологических платежей показал увеличение поступлений от штрафов за нарушение природоохранного законодательства, что может свидетельствовать как об ужесточении контроля, так и о росте числа инцидентов.

Доходы федерального бюджета от природопользования в РФ являются совокупностью налогов, сборов и платежей, основанных на использовании природных ресурсов (табл. 1).

Общая сумма платежей при пользовании природными ресурсами в 2024 г. составила 1427,33 млрд руб., что на 54,1 % больше, чем в 2023 г. и на 88,4 % больше, чем в 2015 г. Увеличение произошло практически по всем основным направлениями платы (табл. 1).

Общая сумма налогов за пользование природными ресурсами увеличилась на 32,0 % по сравнению с 2023 г. до 14570,35 млрд руб. в 2024 г., а по сравнению с 2015 г. увеличение произошло на 358 % в 2024 г. Наиболее сильно рос объём собранных налогов на добычу полезных ископаемых.

При анализе доходов федерального бюджета учитываются и неотражённые в таблице 1 показатели, такие как:

- платежи, полученные в результате погашения задолженности и перерасчётов по

отменённым налогам, сборам и иным обязательным платежам. В последние годы доходы от задолженностей превышают расходы;

- платежи, связанные с реализацией лесоматериалов, добытых в результате осуществления мероприятий, связанных с охраной и защитой лесов, при размещении госзаказа на их выполнение без продажи лесных насаждений для заготовки лесоматериалов;

- платежи, связанные с предоставлением прав на хозяйственные соглашения.

Доходы консолидированного бюджета от природопользования представлены в таблице 2.

В 2024 г. наблюдалось увеличение платежей за использование природных ресурсов и составило 1481,26 млрд руб., что на 79,5 % больше по сравнению с 2023 г., а по сравнению с 2015 г., увеличение по данному направлению произошло на 648,5 %. В целом в 2024 г. наблюдалось увеличение доходов консолидированного бюджета от налоговых поступлений на 31,3 %.

В 2024 г. также значительно возросли доходы от продажи на аукционе права на заключение договора о закреплении долей квот добычи ВБР и др., достигнув 221,83 млрд руб. Этот показатель существенно превышает значения предыдущих лет, что может свидетельствовать об активизации деятельности в сфере рыболовства и аквакультуры, а также об изменении нормативно-правовой базы, регулирующей данный вид деятельности.

Доходы от вывозных таможенных пошлин на сырую нефть в 2024 г. показали отрицательное значение (–3,38 млрд руб.). Это связано с изменениями в экспортных ценах на нефть, объёмах экспорта, а также с корректировкой таможенных ставок. Важно отметить, что доходы от вывозных таможенных пошлин на природный газ, напротив, увеличились, составив 489,98 млрд руб., что в какой-то степени компенсирует потери доходов от внешнеэкономической деятельности в отношении продажи нефти.

В целом, структура доходов консолидированного бюджета от природных ресурсов и природопользования претерпела изменения в период с 2015 по 2024 гг. Увеличение доли платежей за пользование природными ресурсами и доходов от продажи прав на добычу ВБР свидетельствует о переориентации бюджетной политики в сторону более активного использования природного потенциала страны.

Несмотря на значительные колебания в отдельные годы, наблюдается тенденция

Таблица 1 / Table 1

Динамика основных прямых доходов федерального бюджета от природных ресурсов и природопользования Российской Федерации, 2015–2024 гг., млрд руб. [4] / Dynamics of the main direct revenues of the federal budget from natural resources and environmental management in the Russian Federation, 2015–2024, billion rubles [4]

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | Год / Year | | | | | | | | | |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| | Налоги на прибыль, доходы, из них / Income taxes, including | | | | | | | | | |
| Налог на прибыль организаций при выполнении соглашений о разделе продукции и др. / Corporate income tax in the context of production sharing agreements and others | 31,60 | 18,40 | 12,60 | 61,30 | 107,20 | 118,32 | 148,07 | – | – | – |
| Налоги, сборы и регулярные платежи за пользование природными ресурсами – всего / Taxes, fees, and regular payments for the use of natural resources are just a few examples | 3181,20 | 2883,00 | 4090,30 | 6106,90 | 6173,06 | 4057,49 | 8297,75 | 12573,47 | 11041,77 | 14570,35 |
| | Из них / Of these | | | | | | | | | |
| Налог на добычу полезных ископаемых / Mining tax | 3160,00 | 2863,50 | 4061,40 | 6060,40 | 6024,87 | 3872,85 | 7240,35 | 10843,13 | 9701,23 | 12467,18 |
| Регулярные платежи за добычу полезных ископаемых (роялти) при выполнении соглашений о разделе продукции / Regular payments for mineral extraction (royalties) under productions haring agreements | 18,20 | 16,70 | 26,10 | 43,30 | 43,43 | 31,59 | 44,11 | 40,01 | 38,07 | 44,46 |
| Водный налог / Water tax | 2,60 | 2,30 | 2,40 | 2,80 | 3,21 | 5,57 | 4,13 | 4,66 | 5,31 | 6,76 |
| Сборы за пользование объектами животного мира и за пользование объектами ВБР / Fees for using animal resources and for using ABR | 0,40 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,46 | 0,46 | 0,50 | 0,62 | 4,55 | 2,99 |
| | Доходы от использования имущества, находящегося в государственной и муниципальной собственности, из них Income from the use of state and municipal property, including | | | | | | | | | |
| Доходы, получаемые в виде арендной платы за землю после разграничения государственности и др. / Income received in the form of land rent after the delineation of state property, etc. | 9,00 | 9,40 | 9,80 | 9,70 | 11,91 | 20,84 | 12,38 | 13,34 | – | 15,06 |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | Год / Year | | | | | | | | | |
|--|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Плата по соглашениям об установлении сервитута в отношении земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности / Fees for easement agreements on land plots that are state or municipal property | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | 0,10 | 0,54 | 0,02 | 0,16 | – | 0,30 |
| Платежи при использовании природных ресурсыми – всего / Payments for the use of natural resources – only | 166,30 | 236,60 | 344,00 | 344,30 | 474,32 | 593,46 | 666,52 | 481,28 | 772,48 | 1427,33 |
| Из них / Of these | | | | | | | | | | |
| Плата за негативное воздействие на ОС / Payment for negative environmental impact | 5,40 | 1,10 | 0,70 | 0,65 | 0,65 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | – |
| Платежи при использовании недр / Payments for the use of mineral resources | 41,50 | 55,30 | 67,70 | 27,30 | 48,14 | 50,09 | 70,14 | 40,59 | 25,98 | 25,56 |
| Платежи за пользование ВВР по межправительственным соглашениям / Payments for the use of the World Bank's facilities under intergovernmental agreements | 1,73 | 1,57 | 1,61 | 1,72 | 1,81 | 2,15 | 1,12 | 0,43 | 3,34 | 1,91 |
| Плата за использование лесов / Payment for the use of forests | 17,70 | 19,20 | 21,00 | 29,54 | 34,46 | 40,16 | 44,21 | 46,46 | 49,83 | 53,82 |
| Плата за пользование водными объектами / Payment for the use of water bodies | 11,30 | 13,30 | 15,40 | 18,10 | 19,87 | 20,49 | 22,77 | 24,75 | 27,14 | 32,99 |
| Доходы в виде платы за предоставление рыбопромыслового участка, полученной от победителя конкурса, и др. / Income in the form of fees for the provision of a fishing area received from the winner of the competition, etc. | 0,02 | 0,18 | 0,69 | 0,63 | 0,25 | 0,23 | 0,62 | 0,38 | 0,47 | 1,22 |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | Год / Year | | | | | | | | | |
|--|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Доходы от продажи на аукционе права на заключение договора о закреплении долей квот добычи ВБР и др. / Income from auctions for the right to conclude a contract on the distribution of shares in the extraction of aquatic biological resources, etc. | 3,50 | 8,60 | 26,30 | 0,24 | 46,89 | 111,73 | 6,11 | 2,65 | 2,41 | 0,63 |
| Сборы за участие в конкурсе (аукционе) на право пользования недрами / Fees for participation in a competition (auction) for the right to use subsoil resources | 0,07 | 0,08 | 0,05 | 0,09 | 0,11 | 0,05 | – | 0,04 | – | 0,04 |
| Утилизационный сбор / Recycling fee | 84,70 | 137,10 | 205,90 | 263,20 | 225,78 | 364,32 | 515,94 | 361,23 | 658,97 | 1085,92 |
| Экологический сбор / Environmental fee | – | – | 1,33 | 2,59 | 2,47 | 3,99 | 5,06 | 4,38 | 4,01 | 3,77 |
| Доходы от продажи материальных активов, из них / Income from the sale of tangible and intangible assets, including | | | | | | | | | | |
| Доходы в виде доли прибыльной продукции государства при выполнении соглашений о разделе продукции / Income in the form of a share of the state's profitable production under production sharing agreements | 32,20 | 15,30 | 25,90 | 46,70 | 44,01 | 26,29 | 48,00 | 62,45 | 54,33 | 64,86 |
| Доходы от продажи земельных участков, находящихся в государственной и муниципальной собственности, и др. / Income from the sale of state-owned and municipal land plots, etc. | 1,60 | 2,10 | 1,20 | 1,70 | 1,65 | 3,23 | 3,40 | 1,73 | 3,02 | 5,69 |
| Административные платежи и сборы, из них / Administrative payments and fees, including | | | | | | | | | | |
| Сборы, вносимые заказчиком документации, подлежащей государственной экологической экспертизе, и др. / Fees paid by the customer for documentation subject to state environmental expertise, etc. | 0,33 | 0,33 | 0,29 | 0,29 | 0,30 | 0,45 | 0,50 | 0,50 | 0,60 | 0,58 |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | Год / Year | | | | | | | | | |
|--|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Плата, взимаемая при исполнении государственной функции по проведению экспертизы проектов геологического изучения недр, и др. / Fees charged for performing the state function of conducting an expert review of projects for geological exploration of subsoil resources, etc. | 0,33 | 0,39 | 0,33 | 0,31 | 0,36 | 0,38 | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,43 |
| Штрафы, санкции, возмещение ущерба, из них / Fines, penalties, and damages, including | | | | | | | | | | |
| Денежные взыскания (штрафы) за нарушение законодательства о недрах, об особо охраняемых природных территориях, об охране животного мира, лесного, водного законодательства и др. / Monetary penalties (fines) for violations of subsoil legislation, legislation on protected areas, legislation on animal protection, forest legislation, water legislation, etc. | 1,73 | 1,48 | 1,58 | 1,84 | 2,18 | – | – | – | – | – |
| Административные штрафы за правонарушения в области охраны ОС и природопользования и др. / Administrative fines for environmental and nature management of offenses, etc. | – | – | – | – | – | 2,25 | 4,22 | 1,42 | 0,73 | 0,86 |
| Штрафы за экологические преступления / Fines for environmental crimes | – | – | – | – | – | 0,06 | 0,11 | 0,11 | 0,16 | 0,14 |
| Штрафы, неустойки, пени, уплаченные в соответствии с договорами водопользования и аренды лесного участка или купли-продажи лесных насаждений / Fines, penalties, and interest paid in accordance with water use and forest lease agreements or forest plantation purchase and sale agreements | – | – | – | – | – | 0,00 | 0,01 | – | 0,50 | – |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | Год / Year | | | | | | | | | |
|--|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Платежи по искам о возмещении вреда, причинённого ОС и др. / Payments for claims for compensation for damage to the environment, etc. | - | - | - | - | - | 0,06 | 146,75 | 76,72 | 52,03 | 0,04 |
| Государственная пошлина / State duty | | | | | | | | | | |
| Из них государственная пошлина за выдачу разрешения на трансграничное перемещение опасных отходов, за предоставление разрешения на добычу объектов животного мира и др. / These include state fees for issuing permits for the cross-border movement of hazardous waste, permits for the extraction of wild life, etc. | 0,66 | 0,64 | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 0,60 | 0,81 | 0,00 | 0,66 | 0,66 |
| Доходы от внешнеэкономической деятельности, из них вывозные таможенные пошлины на Income from foreign economic activity, including export customs duties on | | | | | | | | | | |
| Сырую нефть / Crude oil | 1431,20 | 1030,80 | 976,20 | 1550,20 | 1115,49 | 436,00 | 707,77 | 606,81 | 283,95 | 2569,16 |
| Природный газ / Natural gas | 552,50 | 536,50 | 576,20 | 809,30 | 695,67 | 439,10 | 1125,40 | 1630,11 | 566,01 | 489,98 |
| Итого / Total | 5408,70 | 4735,10 | 6036,10 | 8939,10 | 8626,90 | 5699,14 | 11162,11 | 2731,46 | 2453,34 | 2569,16 |
| В % от всех доходов федерального бюджета / As a percentage of all federal budget revenues | 39,59 | 35,17 | 40,00 | 59,24 | 42,32 | 30,44 | 44,14 | 9,82 | 8,42 | 8,33 |
| Всего доходов федерального бюджета Total federal budget revenues | 13659,20 | 13460,00 | 15090,25 | 15088,90 | 19464,40 | 18722,20 | 25286,38 | 27824,39 | 29124,05 | 36708,60 |

Примечание к таблицам 1–3: прочерк означает, что данные не были представлены в исследуемом году; ВБР – водные биологические ресурсы, ОС – окружающая среда.
 Note for Tables 1–3: A dash indicates that data were not available in the year under study; ABR – aquatic biological resources.

Таблица 2 / Table 2

Динамика основных прямых доходов консолидированного бюджета от природных ресурсов и природопользования в Российской Федерации, 2015–2024 гг., млрд руб. [5] / Dynamics of the main direct revenues of the consolidated budget from natural resources and environmental management in the Russian Federation, 2015–2024, billion rubles [5]

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| Налоги на прибыль, доходы, из них / Incometaxes, including | | | | | | | | | | |
| Налог на прибыль организаций при выполнении соглашений о разделе продукции и др. Corporate income tax in the context of production sharing agreements and others | 158,20 | 92,20 | 50,50 | 96,40 | 179,40 | 193,57 | 248,19 | – | – | – |
| Налоги, сборы и регулярные платежи за пользование природными ресурсами – всего / Taxes, fees, and regular payments for the use of natural resources are just a few examples | 3250,70 | 2951,80 | 4162,90 | 6178,50 | 6258,93 | 4057,49 | 8400,04 | 12705,78 | 11241,98 | 14758,03 |
| Из них / Of these | | | | | | | | | | |
| Налог на добычу полезных ископаемых Mining tax | 3226,80 | 2929,40 | 4130,40 | 6127,40 | 6106,39 | 3953,65 | 7338,11 | 10970,89 | 9880,94 | 12640,37 |
| Регулярные платежи за добычу полезных ископаемых (роялти) при выполнении соглашений о разделе продукции / Regular payments for mineral extraction (royalties) under productions sharing agreements | 19,10 | 17,60 | 27,40 | 45,50 | 45,59 | 33,15 | 46,28 | 41,70 | 39,85 | 46,50 |
| Водный налог / Water tax | 2,60 | 2,30 | 2,40 | 2,80 | 3,21 | 3,57 | 4,13 | 4,66 | 5,31 | 6,76 |
| Сборы за пользование объектами животного мира и за пользование объектами ВБР / Fees for using animal resources and ABR | 2,20 | 2,60 | 2,75 | 2,90 | 2,65 | 2,61 | 2,86 | 3,48 | 23,17 | 15,44 |
| Доходы от использования имущества, находящегося в государственной и муниципальной собственности, из них Income from the use of state and municipal property, including | | | | | | | | | | |
| Доходы, получаемые в виде арендной платы за землю после разграничений государственности и др. / Income received in the form of land rent after the division of state property, etc. | 28,80 | 32,50 | 34,60 | 35,20 | 38,28 | 38,42 | 44,24 | 13,34 | – | 101,29 |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Плата по соглашениям об установлении сервитута в отношении земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности / Fees for easement agreements on land plots that are state or municipal property | 0,03 | 0,01 | 0,15 | 0,20 | 0,44 | 0,57 | 0,02 | - | - | - |
| Платежи при использовании природными ресурсами – всего / Payments for the use of natural resources – only | 198,70 | 272,70 | 369,50 | 376,20 | 508,12 | 630,52 | 717,64 | 531,14 | 825,34 | 1481,26 |
| Из них / Of these | | | | | | | | | | |
| Плата за негативное воздействие на ОС / Fees for negative impact on the environment | 26,75 | 22,16 | 14,22 | 13,05 | 13,08 | 14,48 | 19,79 | 20,77 | 21,52 | 22,40 |
| Платежи при использовании недрами / Payments for the use of mineral resources | 45,90 | 61,70 | 72,20 | 32,40 | 53,52 | 54,53 | 76,73 | 47,09 | 36,29 | 33,24 |
| Платежи за пользование ВБР по межправительственным соглашениям / Payments for the use of ABR under intergovernmental agreements | 1,73 | 1,57 | 1,61 | 1,72 | 1,81 | 2,15 | 1,12 | 0,43 | 3,34 | 1,91 |
| Плата за использование лесов / Payment for the use of forests | 24,30 | 27,70 | 31,47 | 43,84 | 50,41 | 56,64 | 68,95 | 69,03 | 70,83 | 77,65 |
| Плата за пользование водными объектами / Payment for the use of water bodies | 11,30 | 13,30 | 15,40 | 18,10 | 19,87 | 20,49 | 22,78 | 24,75 | 27,17 | 33,00 |
| Доходы в виде платы за предоставление рыбопромыслового участка, полученной от победителя конкурса, и др. / Income in the form of fees for the provision of a fishing area received from the winner of the competition, etc. | 0,02 | 0,18 | 0,69 | 0,63 | 0,25 | 0,23 | 0,62 | 0,38 | 0,48 | 1,22 |
| Доходы от продажи на аукционе права на заключение договора о закреплении долей квот добычи ВБР и др. / Income from the auction of the right to conclude a contract on the allocation of shares in the extraction of ABR and other income | 3,50 | 8,60 | 26,30 | 0,23 | 46,89 | 111,73 | 6,11 | 2,65 | 2,41 | 221,83 |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|---|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Сборы за участие в конкурсе (аукционе) на право пользования недрами / Fees for participation in a competition (auction) for the right to use subsoil resources | 0,13 | 0,12 | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,07 | - | - | - | 0,0001 |
| Утилизационный сбор / Recycling fee | 84,70 | 137,10 | 205,90 | 263,20 | 319,18 | 364,32 | 515,94 | 361,23 | 658,97 | 1085,92 |
| Экологический сбор / Environmental fee | - | - | 1,33 | 2,59 | 2,47 | 3,99 | 5,06 | 4,38 | 4,01 | 3,77 |
| Доходы от продажи материальных и нематериальных активов, из них / Income from the sale of tangible and intangible assets, including | | | | | | | | | | |
| Доходы в виде доли прибыльной продукции государства при выполнении соглашений о разделе продукции / Income in the form of a share of the state's profitable production under production sharing agreements | 44,30 | 30,60 | 51,80 | 93,30 | 88,01 | 52,57 | 96,00 | 124,89 | 108,66 | 129,72 |
| Доходы от продажи земельных участков, находящихся в государственной и муниципальной собственности, и др. / Income from the sale of state-owned and municipal land plots, etc. | 38,40 | 36,30 | 36,70 | 37,10 | 30,10 | 33,75 | 40,69 | 59,43 | 57,77 | 72,97 |
| Плата за увеличение площади земельных участков, находящихся в частной собственности, и др. / Fees for increasing the area of privately owned land plots, etc. | 0,09 | 1,18 | 1,70 | 2,23 | 3,05 | 3,11 | 11,04 | - | - | 10,19 |
| Административные платежи и сборы, из них / Administrative payments and fees, including | | | | | | | | | | |
| Сборы, вносимые заказчиком документации, подлежащей государственной экологической экспертизе, и др. / Fees paid by the customer for documentation subject to state environmental expertise, etc. | 0,35 | 0,34 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,46 | 0,51 | 0,50 | 0,61 | 0,58 |
| Плата, взимаемая при исполнении государственной функции по проведению экспертизы проектов геологического изучения недр, и др. / Fees charged for performing the state function of conducting an expert review of projects for geological exploration of subsoil resources, etc. | 0,33 | 0,39 | 0,33 | 0,31 | 0,36 | 0,38 | 0,40 | 1,84 | 0,40 | 0,43 |

| Вид дохода и названия налогов, сборов и платежей / Type of income and names of taxes, fees, and payments | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Штрафы, санкции, возмещение ущерба, из них / Fines, penalties, and damages, including | | | | | | | | | | |
| Административные штрафы за право нарушение в области охраны ОС и природопользования и др. / Administrative fines for environmental and nature management offenses, etc. | - | - | - | - | - | 4,56 | 8,01 | 1,42 | 1,32 | 1,43 |
| Штрафы за экологические преступления / Fines for environmental crimes | - | - | - | - | - | 0,06 | 0,08 | 1,05 | 0,16 | 0,14 |
| Штрафы, неустойки, пени, уплаченные в соответствии с договорами водопользования и аренды лесного участка или купли-продажи лесных насаждений / Fines, penalties, and interest paid in accordance with water use and forest lease agreements or forest plantation purchase and sale agreements | - | - | - | - | - | 0,34 | 0,63 | 4,01 | 0,50 | - |
| Платежи по искам о возмещении вреда, причинённого ОС и др. / Payments for claims for compensation for damage to the environment, etc. | 1,02 | 1,86 | 2,07 | 1,73 | 2,30 | 2,42 | 151,99 | 76,72 | 61,95 | 8,01 |
| Государственная пошлина / State duty | | | | | | | | | | |
| Из них государственная пошлина за выдачу разрешения на трансграничное перемещение опасных отходов, за предоставление разрешения на добычу объектов животного мира и др. / These include state fees for issuing permits for the cross-border movement of hazardous waste, permits for the extraction of wild life, etc. | 0,71 | 0,71 | 0,75 | 0,76 | 0,76 | 0,59 | 0,81 | 1,62 | 0,66 | 0,67 |
| Доходы от внешнеэкономической деятельности, из них вывозные таможенные пошлины на Income from foreign economic activity, including export customs duties on | | | | | | | | | | |
| Сырую нефть / Crude oil | 1431,20 | 1030,80 | 976,16 | 1550,00 | 1115,49 | 436,02 | 707,77 | 606,81 | 283,95 | -3,38 |
| Природный газ / Natural gas | 552,50 | 536,50 | 576,24 | 809,30 | 695,67 | 439,15 | 1125,40 | 1630,11 | 566,01 | 489,98 |
| Итого / Total | 6056,70 | 5332,30 | 6624,80 | 9557,10 | 9279,04 | 5894,04 | 11553,46 | 2731,45 | 2453,34 | 2569,16 |
| В % от всех доходов федерального бюджета / As a percentage of all federal budget revenues | 22,49 | 18,92 | 21,33 | 25,60 | 23,49 | 15,43 | 24,01 | 9,82 | 8,42 | 7,0 |
| Всего доходов федерального бюджета / Total federal budget revenues | 26922,00 | 28181,50 | 31046,70 | 37320,10 | 39497,59 | 38205,71 | 48118,40 | 27824,39 | 29124,05 | 36708,60 |

к увеличению поступлений от данной сферы, что свидетельствует о её важной роли в формировании доходной базы бюджета. Вместе с тем, устойчивое развитие подразумевает не только получение доходов от использования природных ресурсов, но и активное инвестирование в снижение негативного воздействия на ОС.

Реализация концепции устойчивого развития обуславливает осуществление экономического роста при снижении негативного воздействия на ОС. Для достижения этого необходимы инвестиции в охрану ОС, стимулирование которых, прежде всего, должна обеспечивать национальная экологическая политика [6].

Вследствие этого результативность природоохранной деятельности значительно зависит от финансового фактора – объёма инвестиций в развитие и модернизацию предприятий, проведение водо-, почвозащитных мероприятий, развитие мониторинговой сети. Тремя наиболее значительными категориями затрат на охрану ОС являются: текущие затраты, капитальный ремонт, инвестиции в основной капитал. Текущие затраты являются издержками по содержанию и эксплуатации природоохранных объектов, расходами предприятий на охрану ОС и др. Под расходами на капитальный ремонт понимаются инвестиции в модернизацию и обновление основных фондов предприятий по охране ОС. Инвестиции в основной капитал представляют расходы на строительство, ремонт и приобретение нового оборудования, направленного на снижение негативного воздействия на ОС.

В таблице 3 представлена динамика инвестиций в основной капитал в РФ за период 2015–2024 гг.

Исследование динамики инвестиций в основной капитал, направленных на охрану ОС в РФ в период с 2015 по 2024 гг., показывает разнонаправленные тенденции, но начиная с 2017 г. объём финансовых вложений продемонстрировал существенный рост, более чем в два раза, что отражает усиление внимания к экологическим вопросам как со стороны государства, так и со стороны бизнеса. Однако структура этих инвестиций претерпела заметные изменения, отражая меняющиеся приоритеты в сфере охраны ОС. В начале рассматриваемого периода доминирующее положение занимали инвестиции в охрану и рациональное использование водных ресурсов. Однако, начиная с 2023 г., наблюдается чёткая тенденция к перераспределению инвестиционных потоков в сторону очистки сточных вод,

что объясняется ужесточением экологических стандартов и внедрением передовых технологий очистки. Значительные средства также направлялись на охрану атмосферного воздуха, особенно в последние годы рассматриваемого периода (2021–2024), что связано с ужесточением экологических стандартов, увеличением выбросов от промышленных предприятий и транспорта, а также с проблемами, вызванными изменением климата.

Инвестиции в охрану и рациональное использование земель оставались относительно стабильными, за исключением резкого увеличения вложений в 2021 г. Начиная с 2023 г. данное направление инвестиций было трансформировано в защиту и «экологическую реабилитацию земель, поверхностных и подземных водных объектов», что свидетельствует о расширении внимания и комплексном подходе к восстановлению экосистем.

В целом, проведённый анализ динамики инвестиций в основной капитал, направленных на охрану ОС, указывает на устойчивую тенденцию к увеличению финансирования природоохранной деятельности. Это сопровождается переориентацией приоритетов в соответствии с наиболее актуальными экологическими задачами, стоящими перед государством и бизнесом в сфере охраны ОС и сохранения биологических ресурсов.

Анализ эффективности инвестиций, направленных на охрану ОС, представляет собой важный аспект дальнейших исследований в данном направлении. Необходимо оценить, насколько вложенные средства способствуют достижению конкретных экологических результатов, таких как снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха, улучшение качества воды в водоёмах, восстановление деградированных земель. Такая оценка позволит определить наиболее эффективные направления инвестирования и оптимизировать распределение ресурсов в будущем [7].

Стоит отметить, что на динамику инвестиций в охрану ОС оказывают влияние различные факторы, включая экономическую ситуацию в стране, политические приоритеты, технологический прогресс и международные обязательства. Соответственно, экономический рост способствует увеличению финансовых возможностей для реализации природоохранных проектов, в то время как экономические кризисы могут приводить к сокращению инвестиций в данную сферу, что влечёт за собой сокращение исследований, направленных на защиту ОС.

Таблица 3 / Table 3
Динамика инвестиций в основную капитал на охрану окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов в Российской Федерации, 2015–2024 гг. (по данным Росстата) / Dynamics of investments in fixed assets for environmental protection and rational use of natural resources in the Russian Federation, 2015–2024 (according to Rosstat data)

| Направление инвестиций / Investment direction | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 ² | 2024 ² |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|
| Инвестиции в основной капитал – всего Investments in fixed assets – total | 151788 | 139677 | 154042 | 157651 | 175029 | 195962 | 299408 | 306887 | 371292 | 375289 |
| Млн руб. (в фактически действовавших ценах) / Million rubles (in actual prices) | | | | | | | | | | |
| в том числе / Including | | | | | | | | | | |
| На охрану и рациональное использование водных ресурсов / On the protection and rational use of water resources | 78962 | 67469 | 66496 | 62750 | 71805 | 91275 | 92511 | 110560 | – | – |
| На обращение со сточными водами ¹ On wastewater treatment | – | – | – | – | – | – | – | – | 127758 | 140697 |
| На охрану атмосферного воздуха For the protection of atmospheric air | 40120 | 40340 | 60199 | 65475 | 70250 | 69560 | 130300 | 139273 | – | – |
| На охрану атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата ¹ / To protect the atmosphere and prevent climate change | – | – | – | – | – | – | – | – | 168165 | 148563 |
| На охрану и рациональное использование земель / For the protection and rational use of land | 15703 | 12228 | 10216 | 10011 | 12158 | 15303 | 47473 | 27806 | – | – |
| На защиту и экологическую реабилитацию земель, поверхностных и подземных водных объектов ¹ / For the protection and rational use of land | – | – | – | – | – | – | – | – | 28820 | 25864 |

Примечание: 1 – начиная с 2023 г. наименование направлений природоохранной деятельности определены на основании Общероссийского классификатора направлений природоохранной деятельности и деятельности по управлению природными ресурсами (ОКНДУПР); 2 – без учета статистической информации по Донецкой и Луганской Народным Республикам, Запорожской и Херсонской областям. / Note: 1 – starting from 2023, the names of the areas of environmental protection activities are determined on the basis of the All-Russian Classifier of Areas of Environmental Protection and Natural Resource Management Activities; 2 – excluding statistical information for the Donetsk and Luhansk People's Republics, Zaporizhzhia and Kherson Oblasts.

Реализация концепции устойчивого развития обуславливает осуществление экономического роста при снижении негативного воздействия на ОС. Для достижения этого необходимы инвестиции в охрану ОС. Успешное развитие экономики напрямую зависит от этих инвестиций, которые, в свою очередь, способствуют снижению негативного воздействия хозяйственной деятельности [8]. Продолжением развития в этом направлении является то, что уже в стратегических документах России, таких как Концепция долгосрочного социально-экономического развития до 2020 г., предусматривался переход от экспортно-сырьевой к инновационной модели экономического роста, включая формирование сбалансированной экологически ориентированной модели развития экономики [9].

Ещё одним важнейшим аспектом является стимулирование крупных частных компаний к инвестициям в природоохранную отрасль. Государство в этом плане может использовать различные инструменты, такие как налоговые льготы, субсидии, гранты и другие механизмы финансовой поддержки, чтобы привлечь бизнес к реализации экологических проектов. Также необходимо развивать механизмы государственно-частного партнёрства, которые позволят объединить ресурсы государства и бизнеса для достижения общих целей в сфере охраны ОС [10]. Важным источником финансирования природоохранных мероприятий выступают так называемые «окрашенные платежи». В частности, с 2022 г. более 57 млрд руб. таких средств поступило в федеральный и региональные бюджеты страны, из которых 10,8 млрд руб. получил федеральный бюджет и почти 47 млрд руб. – региональные бюджеты. Эти средства могут быть направлены, в том числе, на стимулирование дальнейших инвестиций в экологическую сферу [11, 12].

Заключение

Инвестиции в основной капитал, ориентированные на охрану ОС, являются значимым фактором устойчивого развития РФ. Увеличение финансирования природоохранных мероприятий в сочетании с оптимизацией использования инвестиционных ресурсов способствует минимизации антропогенного воздействия на ОС, повышая качество жизни населения и укрепляя экологическую безопасность страны в контексте национальной безопасности страны. Проведённый анализ динамики доходов бюджетов от природополь-

зования и инвестиций в основной капитал указывает на устойчивую тенденцию к увеличению финансирования природоохранной деятельности. Это сопровождается переориентацией приоритетов в соответствии с наиболее актуальными экологическими задачами, стоящими перед государством и бизнесом в сфере охраны ОС и сохранения биологических ресурсов.

Исследование выполнено при поддержке Государственного задания № 051-00001-25-04 на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов Федеральному государственному бюджетному учреждению «Всероссийский научно-исследовательский институт охраны окружающей среды». Часть II. Сведения о выполняемых работах. Раздел 3. Научно-методическое обеспечение.

Литература

1. Баширова А.А. Особенности финансового механизма регулирования отношений природопользования в России // Региональные проблемы преобразования экономики. 2017. № 2 (76). С. 79–86. doi: 10.26726/2305-4484-2017-2-79-86
2. Аюшеева С.Н. Сравнительный анализ уровня антропогенного воздействия и платности природопользования на модельных территориях Российской Федерации // Региональная экономика: теория и практика. 2020. Т. 18. № 9. С. 1787–1798. doi: 10.24894/re.18.9.1787
3. Саидова А.С., Петрова А.С., Ардзинба И.Д., Шмыкова Е.В. Научно-методический анализ реализации механизма «окрашенных платежей» в соответствии с изменениями в федеральном законе «Об охране окружающей среды» за период 2022–2024 годы // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 3. С. 202–211.
4. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году». Москва: ФГБУ «ВНИИ Экология», 2025. 601 с.
5. Цику С.Ю. Оценка и анализ динамики и структуры доходов федерального бюджета // Актуальные вопросы современной экономики. 2025. № 6. С. 171–182.
6. Тютюкина Е.Б., Мельников Р.М., Седаш Т.Н., Егорова Д.А. Оценка влияния инструментов экологической политики Российской Федерации на региональные инвестиции в охрану окружающей среды // Экономика региона. 2023. Т. 19. № 1. С. 192–207. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-1-15
7. Тагаева Т.О., Казанцева Л.К. Природоохранные инвестиции в России // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 3. № 1. С. 224–232. doi: 10.33764/2618-981X-2020-3-1-224-232
8. Михеева А.С., Аюшеева С.Н. Экономические инструменты обоснования природоохранных инвестиций. М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2017. 192 с.

9. Волошин В.И. От сырьевой к инновационной модели экономики России: роль нефтегазового экспорта // *Beneficium*. 2024. № 1 (50). С. 40–46. doi: 10.34680/BENEFICIUM.2024.1(50).40-46

10. Прохоров В.В. Использование механизмов государственно-частного партнёрства при реализации экологических проектов // *Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ*. 2020. № 4. С. 3–14. doi: 10.36718/2500-1825-2020-4-3-14

11. Саидова А.С., Ахметзянов Б.З. Понятие «окрашенные платежи» и практическая реализация «окрашенности» в субъектах Российской Федерации (2022–2023 гг.) // *Охрана окружающей среды и заповедное дело*. 2024. Т. 5. № 2. С. 45–51.

12. Саидова А.С., Ардзинба И.Д. Проблема государственной экологической экспертизы при внедрении «новых технологий» // *Охрана окружающей среды и заповедное дело*. 2024. Т. 5. № 1. С. 95–100.

References

1. Bashirova A.A. The typical features of the financial mechanism of regulating the relations of use of natural resources in Russia // *Regional'nyye problemy preobrazovaniya ekonomiki*. 2017. No. 2 (76). P. 79–86 (in Russian). doi: 10.26726/2305-4484-2017-2-79-86

2. Ayusheeva S.N. Comparative analysis of the anthropogenic impact and user-pays principle availability in the model areas of the Russian Federation // *Regional ekonomika: Economics: Theory and Practice*. 2020. V. 18. No. 9. P. 1787–1798 (in Russian). doi: 10.24891/re.18.9.1787

3. Saidova A.S., Petrova A.S., Ardzinba I.D., Shmykova E.V. Scientific and methodological analysis of the “colored payments” mechanism implementation in accordance with amendments to the Federal Law “On environmental protection” for 2022–2024 // *Theoretical and Applied Ecology*. 2025. No. 3. P. 202–211 (in Russian).

4. State Report “On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2024”. Moskva: FGBU “VNI Ekologiya”, 2025. 601 p. (in Russian).

5. Cec S.Yu. Assessment and analysis of the dynamics and structure of federal budget revenues // *Topical Issues of Modern Economy*. 2025. No. 6. P. 171–182 (in Russian).

6. Tyutyukina E.B., Melnikov R.M., Sedash T.N., Egorova D.A. The impact of the Russian environmental policy on regional investments in environmental protection // *Ekonomika regiona / Economy of Regions*. 2023. V. 19. No. 1. P. 192–207 (in Russian). doi: 10.17059/ekon.reg.2023-1-15

7. Tagaeva T.O., Kazantseva L.K. Environmental investment in Russia // *Interekspo Geo-Siberia*. 2020. V. 3. No. 1. P. 224–232 (in Russian). doi: 10.33764/2618-981X-2020-3-1-224-232

8. Mikheeva A.S., Ayusheeva S.N. Economic instruments for justifying environmental investments. Moskva: REU im. G.V. Plekhanova, 2017. 192 p. (in Russian).

9. Voloshin V.I. From the raw material to the innovative model of the Russian economy: the role of oil and gas exports // *Beneficium*. 2024. No. 1 (50). P. 40–46 (in Russian). doi: 10.34680/BENEFICIUM.2024.1(50).40-46

10. Prokhorov V.V. Use of public-private partnership mechanisms in the implementation of environmental projects // *The Social and Economic and Humanitarian Magazine*. 2020. No. 4. P. 3–14 (in Russian). doi: 10.36718/2500-1825-2020-4-3-14

11. Saidova A.S., Akhmetyanov B.Z. The concept of “colored payments” and practical implementation of “coloredness” in the subjects of the Russian Federation (2022–2023) // *Environment protection and nature reserve management*. 2024. V. 5. No. 2. P. 45–51 (in Russian).

12. Saidova A.S., Ardzinba I.D. The problem of state environmental expertise in the implementation of “new technologies” // *Environment protection and nature reserve management*. 2024. V. 5. No. 1. P. 95–100 (in Russian).

Мониторинг сообществ мелких млекопитающих в естественных и нарушенных условиях предгорий Центрального Кавказа

© 2026. Л. Х. Шугушева¹, к. с.-х. н., доцент, М. С. Гудова², н. с.,
М. М. Емкужева², к. б. н., с. н. с., зав. кабинетом,

¹Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004, Россия, г. Нальчик, ул. Чернышевского, д. 173,

²Институт экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН,
360017, Россия, г. Нальчик, ул. И. Арманд, д. 37а,
e-mail: mrapieva@inbox.ru

Развитие садоводства в регионе, в том числе по современным – интенсивной и суперинтенсивной технологиям, а также деятельность гидрометаллургического завода на территории города-курорта Нальчика приводят к увеличению антропогенного воздействия на экосистемы предгорий Центрального Кавказа. Показано, что видовой состав, соотношение видов, структура сообществ мелких млекопитающих находятся в зависимости от степени антропогенной нагрузки. В териофауне выделяются группировки видов, обитающих исключительно в естественных биотопах: *Sorex satunini* Ognev, 1922, *Micromys minutus* Pallas, 1771; виды, обитающие в нарушенных экосистемах: *Crocidura suaveolens* Pallas, 1811, *Mus musculus* Linnaeus, 1758, *Dryomys nitedula* Pallas, 1778, *Cricetus cricetus* Linnaeus, 1758, *Microtus arvalis* Pallas, 1778, и виды, обитающие и в нарушенных, и в естественных биотопах: *Apodemus uralensis* Pallas, 1811, *Apodemus agrarius* Pallas, 1773 и *Terricola majori* Thomas, 1906. Доминантом выступает эврибионт – *Apodemus uralensis*; максимальной доли в сообществе достигает в сильноизменённых ландшафтах, образуя устойчивые популяции. Богатое видовое разнообразие и минимальный индекс доминирования характерны для сообществ слабоизменённых ландшафтов. Напротив, для териокомплекса сильноизменённых местообитаний свойственны максимальный индекс доминирования и минимальный – выравненности, при максимальной выравненности в биотопах естественных экосистем.

Ключевые слова: мониторинг, мелкие млекопитающие, биоразнообразие, сообщество.

Monitoring of small mammals' communities in natural and disturbed biotopes in the Central Caucasus foothills

© 2026. L. H. Shugusheva¹ ORCID: 0000-0002-8505-407X¹

M. S. Gudova² ORCID: 0000-0003-1040-1417²

M. M. Emkuzheva² ORCID: 0000-0003-4278-3325²

¹Kabardino-Balkarian State University named after Kh.M. Berbekov,
173, Chernyshevskogo St., Nalchik, Russia, 360004,

²Institute of Ecology of Mountain Territories named after
A.K. Tembotov of the Russian Academy of Sciences,
37a, Armand St., Nalchik, Russia, 360017,
e-mail: mrapieva@inbox.ru

The development of horticulture in the region, including intensive and super-intensive technologies, as well as the activities of hydrometallurgical plant in the city-resort of Nalchik lead to an increase in anthropogenic impact on the ecosystems in the Central Caucasus foothills. It is shown that the species composition, species ratio, and community structure of Micromammalia depend on the degree of anthropogenic load. In the theriofauna we distinguished three species groups. *Sorex satunini* Ognev, 1922, and *Micromys minutus* Pallas, 1771, inhabit exclusively natural habitats. *Crocidura suaveolens* Pallas, 1811, *Mus musculus* Linnaeus, 1758, *Dryomys nitedula* Pallas, 1778, *Cricetus cricetus* Linnaeus, 1758, and *Microtus arvalis* Pallas, 1778, inhabit disturbed ecosystems. *Apodemus uralensis* Pallas, 1811, *Apodemus agrarius* Pallas, 1773, and *Terricola majori* Thomas, 1906, inhabit both disturbed and natural habitats. *Apodemus uralensis* is the dominant eurybiont, which reaches its maximum share in the community in highly modified landscapes, forming stable populations. The field mouse is a subdominant species, with maximum contribution to the community in slightly disturbed biotopes. At the same time, it gravitates to natural landscapes, reaching high abundance there. Rich species

diversity and minimal dominance index are characteristic of communities of weakly disturbed biotopes. On the contrary, the therio-complex of highly disturbed habitats has the maximum dominance index and minimal equalization index, with maximum equalization in the therio-population of Micromammalia in natural ecosystems. The greatest similarity was noted between the communities of weakly and highly disturbed habitats, converging them are: *Apodemus uralensis*, *Apodemus agrarius*, *Dryomys nitedula*, *Microtus arvalis* and *Crocidura suaveolens*.

Keywords: monitoring, small mammals, biodiversity, community.

За последние десятилетия антропогенная трансформация биосферы стала одним из самых мощных глобальных процессов. Происходят существенные сдвиги в природной обстановке, связанные с изменением характера землепользования [1]. Предгорья Северного Кавказа относятся к наиболее освоенным как в промышленном, так и в сельскохозяйственном отношении. Территория края является житницей страны. В частности, в Кабардино-Балкарской Республике (КБР) земли сельскохозяйственного назначения составляют 711 тыс. га. В общем объёме продукции сельского хозяйства удельный вес продукции растениеводства составляет 56,5 %. В республике развито плодоовощеводство и садоводство. Кабардино-Балкария в 2020 г. возглавила ТОП-5 регионов России по валовому сбору плодов и ягод в товарном секторе. Под сады освоено 23,27 тыс. га. Всё большее развитие в республике получает закладка многолетних насаждений по интенсивной и суперинтенсивной технологиям. Только в 2020 г. освоена площадь в 1380 га. По данным Минсельхоза России, КБР входит в тройку регионов, где наиболее активно идёт закладка многолетних насаждений [2].

На территории республики, в городе-курорте Нальчике, расположено предприятие по производству вольфрамового ангидрида и молибденового концентрата – гидрометаллургический завод (НГМЗ). Сырьём для их производства служат шеелито-вольфрамовые, вольфрамомолибденовые, вольфрамитовые концентраты, а также вольфрамосодержащий скрап.

Сельскохозяйственное и промышленное производство в республике приводит к увеличению антропогенного воздействия, подвергаются трансформации ландшафты, страдают экосистемы, происходят изменения в видовом составе флоры и фауны, в структуре сообществ.

В системе экологического мониторинга важное место занимает наблюдение за популяциями млекопитающих, являющихся индикаторами процессов внутри сообществ, и их реакцией на антропогенную нагрузку [3]. Анализ биоразнообразия, распространения

и пространственного размещения, биотопической приуроченности, плотности видовой населения Micromammalia в нарушенных и естественных условиях позволяет лучше понять особенности биологии отдельных видов, пределы их изменчивости и устойчивости, оптимизировать мероприятия по сохранению биоразнообразия [4–6].

Цель работы: мониторинг и оценка состояния биоразнообразия сообществ мелких млекопитающих нарушенных и естественных территорий предгорий Центрального Кавказа (в пределах КБР).

Материалы и методы исследования

Объект исследования – териокомплекс мелких млекопитающих в естественных и нарушенных условиях предгорий Кабардино-Балкарии.

Сбор материала производился в период с 2011 по 2014 гг., в летнее время стандартным методом ловушко-линий [7]. Животных отлавливали в живоловушки на стандартную приманку (кусочки хлеба, смоченные нерафинированным подсолнечным маслом). Ловушки были расставлены линиями с интервалом 5 м, линия состояла из 50 ловушек. Пересчёт делали на 100 ловушко-суток. Всего отработано 3042 ловушко-суток, улов составил 326 особей мелких млекопитающих.

Для выяснения особенностей биотопической приуроченности вида, его места в сообществах в разных участках его распространения, а также особенностей структуры изучаемого сообщества видов в целом на разных территориях, в том числе и зональных отличий, использован показатель степени биотопической приуроченности [8], позволяющий более точно определить понятие эври- или стенотопности вида.

Для оценки влияния антропогенного пресса разной нагрузки на сообщества мелких млекопитающих трансформированные территории были сгруппированы по классификации [9] на слабоизменённые (СЛИ), условно изменённые, но уже длительно не подвергающиеся непосредственному хозяйственному использованию, и сильноизменённые

ные (СИ), когда ландшафты подвергаются длительному хозяйственному использованию по настоящее время. Для комплексной оценки сообществ использованы индексы видового богатства Маргалефа (DMg), разнообразия Шеннона (H), доминирования Симпсона (d), выравненности Пиелу (E), степени их сходства Чекановского-Съёренсена (Ics) [10, 11]. Расчёты выполнены в программах PAST 4.0 и STATISTICA 10.

Описание районов исследования. Район исследования, в который входят естественные и нарушенные экосистемы предгорий КБР, расположен в лесостепном поясе терского варианта поясности [12]. На равнине и в предгорьях распространён влажный континентальный климат. Значительная часть осадков приходится на тёплый период года, их сумма за вегетационный период составляет 65–75 % от годовой. Чаще всего летние осадки выпадают в виде ливневых дождей.

Видовой состав, биотопическое распределение, численность мелких млекопитающих изучали в двух типах местообитания: естественных (ненарушенных) и нарушенных, которые в свою очередь включали в себя группу биотопов СЛИ (фруктовый сад экологического стационара, не возделываемые огороды, лесополоса) и группу биотопов СИ (фруктовый сад для промышленного выращивания фруктов в окрестностях с. Аушигера, хвостохранилище и санитарно-защитная зона (СЗЗ) НГМЗ). Подробная характеристика изученных местообитаний представлена ниже.

Естественные (ненарушенные) местообитания. Окрестности села Хасаньи (43°24'24.9" с. ш., 43°35'31.2" в. д., 659 м н. у. м.) включали в себя: широколиственный лес (ШЛ): ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*), ольха серая; целинные участки, овраги и балки (ЦУ): злаково-разнотравный ценоз; луговой участок (ЛУ): разнотравно-злаковый биотоп с редкими кустами лещины обыкновенной (*Corylus avellana*). В естественных местообитаниях признаки хозяйственной деятельности отсутствовали.

Нарушенные местообитания. Окрестности г. Нальчика (43°29'36.4" с. ш., 43°34'25.6" в. д.; 496 м н. у. м). Территория НГМЗ: хвостохранилище (ХВ); СЗЗ. Участки расположены среди вторичных лесолуговых сообществ. Берег ХВ представлен разнотравно-злаковым ценозом с преобладанием металлофитной флоры (*Poa pratensis*, *Puccinellia dolicholepis*). Загрязнение тяжёлыми металлами носит мозаичный характер. Пределы содержания молибдена и

вольфрама в почвенных пробах на территории НГМЗ 7,2 и 30 мг/кг сухой массы, соответственно превышение по сравнению с фоном в среднем в 4,0–8,5 раза, в отдельных местах до 25–65 раз [13]. Отработанная руда, сбрасываемая в так называемые «хвосты», наряду с вольфрамом и молибденом содержит целый спектр токсических металлов-спутников, таких как мышьяк, кадмий, ртуть, железо, алюминий, а также различные анионы [14, 15]. В СЗЗ представлены посадки широколистных пород деревьев (*Robinia pseudoacacia*, *Acer platanoides*) и крупные кустарники (*Crataegus* sp., *Rosa* sp., *Corylus avellana* и др.).

Сады в окрестностях с. Аушигера (СА) (43°24'24.3" с. ш., 43°44'23.1" в. д., 591 м н. у. м.): фруктовый сад для промышленного выращивания фруктов (ФСА); лесозащитная полоса (ЛП), прилегающая к ФСА. Фруктовый яблоневый сад с разнотравно-злаковой травянистой растительностью. Трава систематически скашивается. Фруктовые деревья по схеме проходят обработку различными химическими средствами, фунгицидами и биологическими инсектицидами против вредителей. Существуют разные фазы обработки деревьев (до 20 раз) от ранневесенней до осенней – сбора урожая.

Экологический стационар в окрестностях г. Нальчика (ЭСН) (43°29'50.5" с. ш., 43°35'23.2" в. д.; h = 485 м н. у. м.): фруктовый сад (ФСН) и прилегающий участок, ранее использовавшийся под огороды, в настоящее время – не возделываемые огороды (НОГ). Фруктовый сад заложен в 1960 г., представлен посадками плодовых деревьев (*Malus* sp., *Pyrus* sp., *Prunus cerasifera*). Ранее деревья обрабатывались химическими препаратами, производилось скашивание травы, почва под кронами окапывалась, но с 2000 г. обработка фруктового сада прекращена, так же, как и прилегающего к нему участка, использовавшегося ранее под огороды. Травяной ярус представлен разнотравно-злаковым сообществом из густых зарослей бурьяна, *Arctium lappa*, *Urtica urens*, *Araxacum* sp., *Trifolium* sp., *Rubus* sp.

Результаты и обсуждение

Видовой состав, численность, биотопическое распределение, структура сообществ мелких млекопитающих. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) выявить видовой состав, численность, биотопическое распределение; 2) дать сравнительную характеристику сообществ мелких млекопитающих естественных и нарушенных

экосистем с разной степенью антропогенной нагрузки.

Изучение терионаселения мелких млекопитающих в предгорьях Кабардино-Балкарии в естественных и нарушенных биотопах с разной антропогенной нагрузкой показало обитание десяти видов двух отрядов: двух представителей отряда Насекомоядные (Eulipotyphla Waddel et al., 1999) – белозубки малой (*Crocidura suaveolens* Pallas, 1811) и бурозубки кавказской (*Sorex satunini* Ognev, 1922) и восьми таксонов отряда грызунов (Rodentia Bowdich, 1821): малой лесной мыши (*Apodemus uralensis* Pallas, 1811), полевой мыши (*Apodemus agrarius* Pallas, 1771), домовый мыши (*Mus musculus* Linnaeus, 1758), мыши-малютки (*Micromys minutus* Pallas, 1771), обыкновенного хомяка (*Cricetus cricetus* Linnaeus, 1758), обыкновенной полёвки (*Microtus arvalis* Pallas, 1773), кустарниковой полёвки (*Terricola majori* Thomas, 1906) и лесной соны (*Dryomys nitedula* Pallas, 1778) (табл.).

Наиболее широкое распространение на исследованной территории имеет малая лесная мышь, отмеченная во всех изученных биотопах, как естественного, так и антропогенного характера (табл.). В основном она выступает в роли доминанта, в некоторых биотопах является субдоминантом полевой мыши (лесополосы, овраги и балки). Вместе с тем, показатели численности варьируют от редкого (НОГ – 0,8 ос./100 л.с.), до многочисленного (ЛП – 13,2 ос./100 л.с.; СЗЗ – 10,1 ос./100 л.с.) и в естественных лесных насаждениях (10,3 ос./100 л.с.). Причём максимальные значения отмечены в нарушенных местообитаниях – лесополосе, прилегающей к ФСА. Лесополосы являются станциями переживания мелких млекопитающих.

Как показывают наши данные, лесные фитоценозы наиболее предпочтительны для малой лесной мыши. Так, степень биотопической приуроченности высока в сообществах с древесными насаждениями, вид избегает открытых пространств, на НОГ отмечены минимальные значения численности (0,8 ос./100 л.с.) и доли (13,8 %) в сообществе. *Apodemus uralensis* обычна в пяти биотопах из девяти (ФСЭ – 3,1 ос./100 л.с.; ФСА – 2,5 ос./100 л.с.; ХВ НГМЗ – 2,8 ос./100 л.с. и овраги и балки – 8,1 ос./100 л.с.). Максимальный вклад *A. uralensis* в сообщества *Micromammalia* обследованных биотопов наблюдается в нарушенных экосистемах, как в техногенных, так и в агроценозах, что согласуется с данными работы [16]. Лесная мышь отличается слабым

концентрированием поллютантов по сравнению с землеройками и полёвками из-за потребления семенного корма [17]. По-видимому, подобный образ жизни и условия, созданные человеком, позволяют малой лесной мыши образовывать устойчивые популяции в нарушенных экосистемах.

По распространённости и обилию за лесными мышами идёт *Apodemus agrarius*; она отмечена во всех трансформированных биотопах, нет её только в естественных лесных насаждениях и на луговом участке. Для вида наиболее благоприятны не возделываемые огороды, где относительная численность максимальна и равна 13,8 ос./100 л.с., вклад вида здесь наибольший (62,1 %). Полевая мышь тяготеет также к оврагам и балкам с численностью 9,4 ос./100 л.с. В большинстве изученных биотопов вид обычен (в шести биотопах), его доля составляет от 6,9 до 25,0 %. Оптимум ареала на территории Центрального Кавказа, в пределах КБР, привязан к более влажным ландшафтам лесостепного пояса [18]. В степную зону она проникает по речным долинам и орошаемым полям. В высокоствольных лесах, где мало травяной растительности, полевая мышь не расселяется. Предпочитает открытые ландшафты, широколиственные леса и населённые пункты на равнине. Наиболее многочисленна в заболоченных биотопах, сырых лесах, на полях же высокой численности не образует [19]. *Dryomys nitedula* занимает три биотопа, относящихся к нарушенным участкам – это биотопы с древесными насаждениями с примесью плодовых деревьев. По численности вид чаще редок (ФСА – 0,8 ос./100 л.с.; лесополосы СЗЗ – 0,8 ос./100 л.с.), в лесополосах Аушигера – обычен (1,2 ос./100 л.с.), показывает большую привязанность к данному биотопу, хотя доля вида выше в ФСА, где является субдоминантом малой лесной мыши. В предгорном лесостепье и поймах рек соны обитает в различных приречных древесно-кустарниковых насаждениях. Если численность соны рассматривать в масштабе целого пояса Северного Кавказа, то этот вид всюду должен быть отнесён к группе редких видов. Однако в отдельных биотопах дубово-грабового леса с примесью различных фруктовых деревьев лесная сона – обычный вид [20]. *Terricola majori* занимает два биотопа, как природные (ЕЛН), так и нарушенные (ФСЭ), вместе с тем, в естественных лесных насаждениях вид обычен, и долевого вклада в сообщество составляет 17,4 %, тогда как в трансформированном всего – 4,8 %; здесь вид по

Таблица / Table

Биотопическая приуроченность и относительная численность мелких млекопитающих в естественных и нарушенных условиях предгорий Центрального Кавказа / Biotopic preferences and relative abundance of micromammalia in natural and disturbed biotopes in the Central Caucasus foothills

| Вид Species | Биотопы / Biotopes | | | | | | | | |
|-----------------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| | Нарушенные / Disturbed | | | | | | Естественные Natural | | |
| | ЭСН / NES | | СА / AG | | НГМЗ / NHP | | ЛЮ МА | ШЛ BF | ЦУ VL |
| | ФСН ON | НОГ UVG | ЛП FB | ФСА AFG | ХВ WS | СЗЗ SPZ | | | |
| <i>Crocidura suaveolens</i> | <u>0,16</u> ++ | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-0,27</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - |
| <i>Sorex satunini</i> | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>0,14</u> + | <u>0,34</u> + | <u>-1</u> - |
| <i>Apodemus uralensis</i> | <u>0,12</u> ++ | <u>-0,32</u> + | <u>0,34</u> +++ | <u>0,16</u> ++ | <u>0,14</u> ++ | <u>0,21</u> +++ | <u>-0,18</u> + | <u>0,47</u> +++ | <u>-0,17</u> ++ |
| <i>Apodemus agrarius</i> | <u>-0,13</u> + | <u>0,46</u> +++ | <u>-0,37</u> + | <u>-0,42</u> + | <u>-0,12</u> + | <u>0,18</u> ++ | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>0,41</u> ++ |
| <i>Micromys minutus</i> | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>1</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - |
| <i>Mus musculus</i> | <u>-0,18</u> + | <u>0,13</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - |
| <i>Dryomys nitedula</i> | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>0,29</u> ++ | <u>0,18</u> + | <u>-1</u> - | <u>-0,34</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - |
| <i>Microtus arvalis</i> | <u>-0,2</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>0,11</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - |
| <i>Cricetus cricetus</i> | <u>-1</u> - | <u>1</u> ++ | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - |
| <i>Terricola majori</i> | <u>-0,45</u> + | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>-1</u> - | <u>0,11</u> + | <u>-1</u> - |

Примечание: над чертой – степень биотопической приуроченности вида (Fij), под чертой – относительная численность: + – вид редок, численность менее 1%, ++ – вид обычен, численность 1,1–9,9%, +++ – вид многочислен, численность более 10%; расшифровка сокращений дана в разделе «Материалы и методы»; прочерк – вид отсутствует.

Note: degree of biotopic habitat of the species (Fij) is given above the line, relative abundance – below the line: + – species is rare, abundance less than 1%, ++ – species is common, abundance 1.1–9.9%, +++ – species is abundant, abundance more than 10%; explanation of abbreviations is given in the section “Materials and methods”; dash – no species.

численности относится к категории «редкий». Наиболее благоприятные условия для кустарниковой полёвки – это естественные условия, на что указывает высокий индекс биотопической приуроченности. Домовая мышь занимает антропогенные местообитания – агроценозы (ФСЭ и НОГ), вид – синантроп, в летнее время может выселяться из жилищ человека, занимая как природные, так и нарушенные биотопы. На территории экологического стационара расположены жилые и хозяйственные постройки, что создаёт благоприятные условия для обитания этого вида. Вид немногочисленный, обычный, доля в сообществе – 4,8–6,9%, из изученных биотопов больше тяготеет к огородам. Обыкновенная полёвка занимает нарушенные местообитания (НОГ и СЗЗ), доля в сообществах небольшая (3,4–4,0%). В лесостепном поясе терского варианта обыкновенная полёвка селится, на-

чиная от речных долин и населённых пунктов до полей с различными культурами, т. е. ведёт себя как эвритопный вид, с высокой численностью в лесостепи [20]. Исходя из наших данных, обыкновенная полёвка биотопически больше приурочена к СЗЗ, к ценозам с кустарниковой растительностью, численность небольшая, вид относится к категории «редкий».

Обыкновенный хомяк встречается исключительно в огородах, вид обычен, доля вида составляет 10,3%. В работе [20] отмечалась высокая численность *Cricetus cricetus* в отдельных районах лесостепья, особенно в Кабардино-Балкарии; так в 1967 г. в окр. г. Нальчика на 1 га насчитывали до 200 ос. В последние годы отмечается сужение ареала и снижение численности обыкновенного хомяка, хотя в отдельные годы отмечается всплеск численности. Мышь-малютка – стенотопный вид, привязана исключительно к одному био-

топу – естественным лесным насаждениям, где вид обычен, доля вида – 33,3 %, выступает субдоминантом малой лесной мыши.

Представители насекомоядных – *Crocidura suaveolens* и *Sorex satunini* занимают по два биотопа: *C. suaveolens* – антропогенные ландшафты (фруктовый сад экологического стационара, где выступает субдоминантом малой лесной мыши, и ССЗ НГМЗ), *S. satunini* – природные (луговой участок, где является субдоминантом малой лесной мыши, и естественные лесные насаждения). Относительная численность обоих видов от редкого до обычного, вклад в сообщества: *S. satunini* – 16,7–21,7 %, *C. suaveolens* – 4,0–28,6 %.

Видовое разнообразие сообществ мелких млекопитающих в естественных и нарушенных условиях предгорий КБР. Сравнительная характеристика сообществ мелких млекопитающих трёх типов местообитаний с использованием информационных индексов показала наибольшее видовое разнообразие в СЛН экосистемах (рис. 1). Общими для всех группировок, как нарушенных, так и естественных, являются виды широко распространённые – мыши лесные

и полевые, с доминированием первой. Однако в большей степени она представлена в териокомплексе СИ местообитаний (78 %), минимальный вклад вида отмечается на СЛН территориях (50 %). Тогда как здесь, наоборот, максимальная доля полевых мышей (28 %).

Для трансформированных территорий с разной антропогенной нагрузкой отмечены сходные видовые спектры – два вида грызунов и один вид насекомоядных: *Dryomys nitedula*, *Microtus arvalis* и *Crocidura suaveolens*. Высока доля *C. suaveolens* в терионаселении слабоизменённых ландшафтов. *Mus musculus* и *Cricetus cricetus* обитают исключительно в СЛН биотопах, а *S. satunini* и *Micromys minutus* – только в естественных условиях, для жизни им нужны относительно нетронутые, природные биотопы (рис. 2).

Отмечается максимальное видовое разнообразие в сообществе мелких млекопитающих в слабоизменённых местообитаниях, здесь же – минимальные значения индекса доминирования.

При одинаковом количестве видов сильноизменённых и естественных территорий и

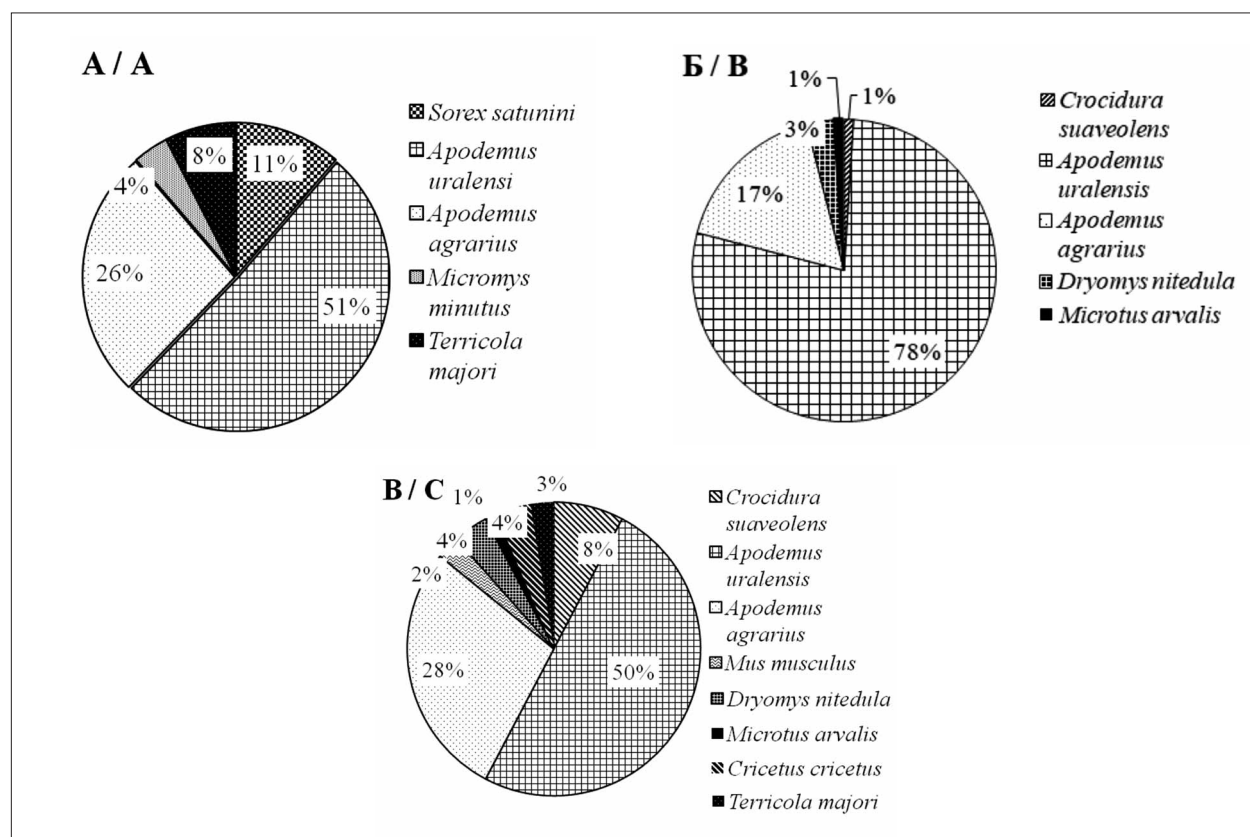


Рис. 1. Видовое соотношение мелких млекопитающих в естественных (А), сильноизменённых (Б) и слабоизменённых (В) биотопах
 Fig. 1. Micromammalia species ratio in natural (A), heavily disturbed (B), and weakly disturbed (C) biotopes

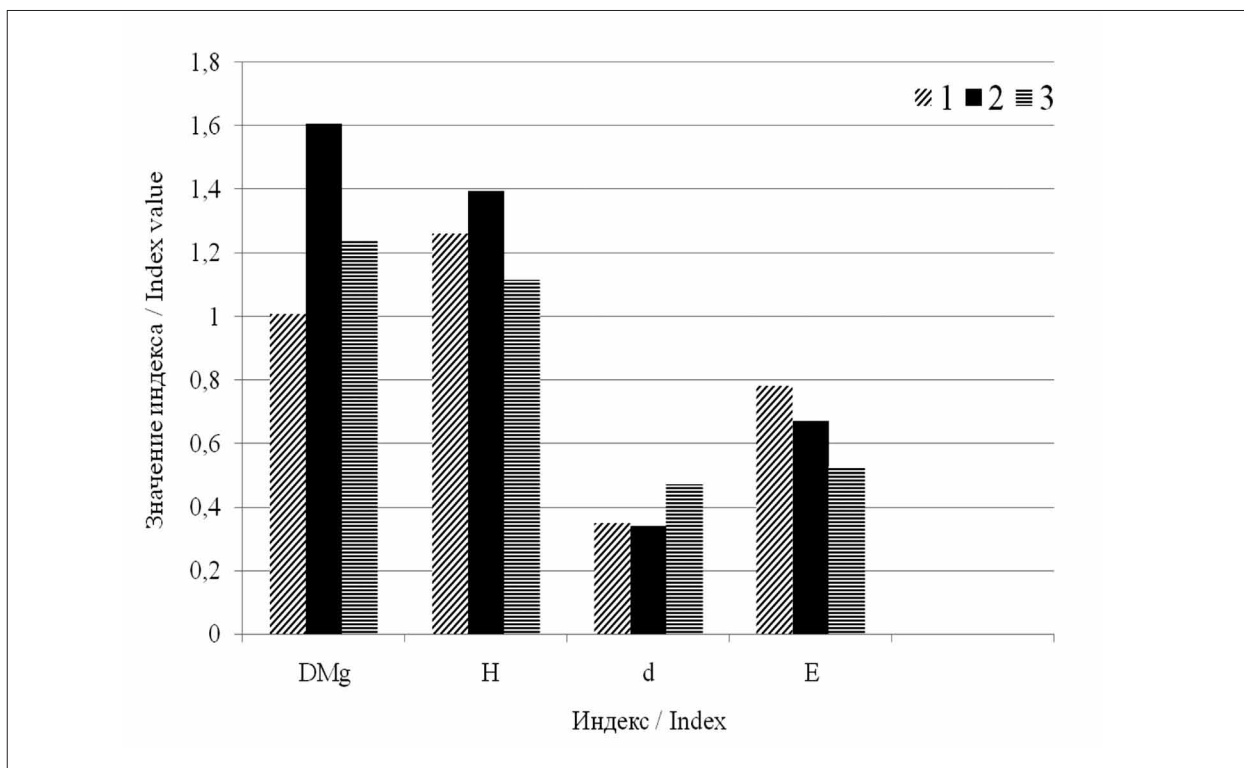


Рис. 2. Видовое разнообразие мелких млекопитающих в естественных (1), слабонарушенных (2) и сильно нарушенных (3) условиях предгорий Кабардино-Балкарской Республики по данным расчёта индексов видового богатства Маргалефа (DMg), разнообразия Шеннона (H), доминирования Симпсона (d), выравненности Пielу (E)

Fig. 2. Micromammalia species diversity in natural (1), slightly disturbed (2) and heavily disturbed (3) biotopes in Kabardino-Balkarian foothills based on the Margalef species richness index (DMg), Shannon diversity (H), Simpson dominance (d), and Pielou evenness (E)

близких значениях индексов видового разнообразия, ненарушенные территории характеризуются максимальным показателем выравненности. Сообществам сильноизменённых местообитаний свойственны высокая степень доминирования и минимальные значения индекса выравненности относительно всех рассматриваемых сообществ. При оценке сходства сообществ использован индекс Чекановского-Съёренсена, который демонстрирует общность видового состава. Наибольший индекс сходства (0,533) отмечен между сообществами слабоизменённых и сильноизменённых местообитаний. Сближающими данные сообщества являются: *Apodemus uralensis*, *Apodemus agrarius*, *Dryomys nitedula*, *Microtus arvalis* и *Crocidura suaveolens*.

Выводы

1. В терионаселении мелких млекопитающих предгорий КБР выделяются группировки видов, обитающих исключительно в естественных биотопах: *Sorex satunini* и *Micromys minutus*; виды, обитающие в нарушенных

экосистемах: *Crocidura suaveolens*, *Dryomys nitedula*, *Mus musculus*, *Cricetus cricetus*, *Microtus arvalis* и виды, обитающие и в нарушенных, и в естественных биотопах: *Apodemus uralensis*, *Apodemus agrarius* и *Terricola majori*.

2. Основу фаунистического комплекса Micromammalia в предгорьях КБР составляет доминант сообществ, эврибионт – малая лесная мышь. Максимальной доли в сообществе данный вид достигает в сильноизменённых ландшафтах, образуя устойчивые популяции; полевая мышь – субдоминант, максимальный вклад в сообщество отмечен в слабоизменённых условиях. Вместе с тем тяготеет к естественным ландшафтам, достигая там высокой численности. Остальные виды – второстепенные, по численности относятся к категории «обычный» или «редкий».

3. Установлена зависимость структуры сообществ мелких млекопитающих от степени антропогенной нагрузки. Териофауна Micromammalia слабоизменённых ландшафтов характеризуется высоким видовым разнообразием и минимальным индексом доминирования. Для териокомплекса естествен-

ных экосистем свойственна максимальная выравненность. При сходном числе видов в терионаселении сильноизменённых и ненарушенных местообитаний первое отличает максимальный индекс доминирования и минимальный – выравненности.

Работа выполнена по программе Государственного задания Института экологии горных территорий им. А.К. Темботова РАН (FMEU-2026-0001 «Разнообразие (генетическое, морфологическое, таксономическое) позвоночных животных, как основа долгосрочного мониторинга природных и антропогенных экосистем».

Литература

1. Nurtdinova D.V., Pyastolova O.A. Ecological characteristics of small rodents living in collective gardens // Russ. J. Ecol. 2004. No. 5. P. 337–341. doi: 10.1023/B:RUSE.0000040688.27950.ea
2. Портал Кабардино-Балкарской Республики [Электронный ресурс] <https://republic.kbr.ru> (Дата обращения: 16.05.2024).
3. Симкин Г.Н. Фаунистическое разнообразие как основа индикации экологических состояний, мониторинга и оптимизации природных экосистем // Бюл. МОИП. Отд. биол. 1995. Т. 100. № 6. С. 3–13.
4. Рябов В.М., Ашихмина Т.Я. Фаунистическая характеристика и данные мониторинга позвоночных животных на территории Государственного природного заказника «Былина» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 79–84. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-079-084
5. Рябов В.М., Рябова Е.В., Ашихмина Т.Я. Оценка биоразнообразия как механизм изменения статуса особо охраняемых природных территорий // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 111–117. doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117
6. Истомин А.В., Михалап С.Г. Анализ пространственной внутривидовой организации мелких млекопитающих с использованием градиентного подхода и многомерного шкалирования // Принципы экологии. 2021. № 3. С. 42–53.
7. Карасёва Е.В., Телицына А.Ю., Жигальский О.А. Методы изучения грызунов в полевых условиях. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 416 с.
8. Песенко Ю.Н. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.
9. Мильков Ф.И. Человек и ландшафты. М.: Мысль, 1973. 224 с.
10. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М.: Мир, 1992. 166 с.
11. Лакин Г.Ф. Биометрия. Москва: Высшая школа, 1990. 350 с.

12. Соколов В.Е., Темботов А.К. Млекопитающие Кавказа: Насекомоядные. М.: Наука, 1989. 548 с.
13. Рапопорт И.Б. Население дождевых червей (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*) в техногенных экосистемах КБР // Биологическое разнообразие Кавказа: труды третьей Международной конференции. Нальчик: Ин-т экологии горных территорий КБНЦ РАН, 2004. С. 72–78.
14. Лукьянова Л.Е., Лукьянов О.А. Реакция сообществ и популяций мелких млекопитающих на техногенные воздействия. I. Сообщества // Успехи современной биологии. 1998. Т. 118. № 5. С. 613–622.
15. Лукьянова Л.Е., Лукьянов О.А. Реакция сообществ и популяций мелких млекопитающих на техногенные воздействия. II. Популяции (Рыжая полёвка как модель) // Успехи современной биологии. 1998. Т. 118. № 6. С. 693–706.
16. Мухачёва С.В., Безель В.С. Химическое загрязнение среды: тяжёлые металлы в пище мелких млекопитающих // Зоологический журнал. 2007. Т. 86. № 4. С. 492–498.
17. Мякушко С.А. Изменение динамики популяций и сообщества грызунов в результате антропогенного воздействия на заповедную экосистему // Вестник зоологии. 1998. Т. 32. № 14. С. 76–85.
18. Темботов А.К., Шхашамиев Х.Х. Животный мир Кабардино-Балкарии. Нальчик: Эльбрус, 1984. 191 с.
19. Карасёва Е.В., Тихонова Г.Н., Богомолов П.Л. Ареал полевой мыши (*Apodemus agrarius*) в СССР и особенности обитания вида в его разных частях // Зоологический журнал. 1992. Т. 71. № 6. С. 106–115.
20. Темботов А.К. География млекопитающих Северного Кавказа. Нальчик: Эльбрус, 1972. 245 с.

References

1. Nurtdinova D.V., Pyastolova O.A. Ecological characteristics of small rodents living in collective gardens // Russ. J. Ecol. 2004. No. 5. P. 337–341. doi: 10.1023/B:RUSE.0000040688.27950.ea
2. Portal of the Kabardino-Balkarian Republic [Internet resource] <https://republic.kbr.ru> (Accessed: 16.05.2024) (in Russian).
3. Simkin G.N. Faunal diversity as a basis for indication of ecological states, monitoring and optimization of natural ecosystems // Byul. MOIP. Otd. biol. 1995. V. 100. No. 6. P. 3–13 (in Russian).
4. Ryabov V.M., Ashikhmina T.Ya. Faunistic characteristics and monitoring of vertebrates on the territory of the State Nature Reserve “Bylina” // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 79–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-079-084
5. Ryabov V.M., Ryabova E.V., Ashikhmin A T.Ya. Assessment of biodiversity as a mechanism for changing the status of specially protected natural areas // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 111–117 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117

6. Istomin A.V., Mikhalap S.G. Analysis of spatial intra-population organization of small mammals using the gradient approach and multidimensional scaling // *Principy ekologii*. 2021. No. 3. P. 42–53 (in Russian).
7. Karasyeva E.V., Telitsyna A.Yu., Zhigalsky O.A. The methods of studying rodents in the wild nature. Moskva: LKI Publ., 2008. 416 p. (in Russian).
8. Pesenko Yu.N. Principles and methods of quantitative analysis in faunistic studies. Moskva: Nauka, 1982. 287 p. (in Russian).
9. Milkov F.I. Man and landscapes. Moskva: Mysl, 1973. 224 p. (in Russian).
10. Magurran A.E. Ecological diversity and its measurement. Moskva: Mir, 1992. 166 p. (in Russian).
11. Lakin G. Biometrics. Moskva: Vysshaya shkola, 1990. 350 p. (in Russian).
12. Sokolov V.E., Tembotov A.K. Mammals of the Caucasus: Insectivores. Moskva: Nauka, 1989. 548 p. (in Russian).
13. Rapoport I.B. Population of earthworms (*Oligochaeta, lumbricidae*) in anthropogenic ecosystems of the KBR // Biodiversity of the Caucasus: Trudy tretyey Mezhdunarodnoi konferentsii. Nalchik: Institut ekologii gornykh territoriy KBNTs RAN. P. 72–78 (in Russian).
14. Lukyanova L.E., Lukyanov O.A. Response of small mammal communities and populations to technogenic effects. I. Communities // *Uspekhi sovremennoi biologii*. 1998. V. 118. No. 5. P. 613–622 (in Russian).
15. Lukyanova L.E., Lukyanov O.A. Response of small mammal communities and populations to technogenic effects. II. Populations (Red-Backed vole as a model) // *Uspekhi sovremennoi biologii*. 1998. V. 118. No. 6. P. 693–706 (in Russian).
16. Mukhacheva S.V., Bezel V.S. Chemical pollution of the environment: heavy metals in the small mammals food // *Zoologicheskii zhurnal*. 2007. V. 86. No. 4. P. 492–498 (in Russian).
17. Myakushko S.A. Changes in the dynamics of rodent populations and communities as a result of anthropogenic impact on the protected ecosystem // *Vestnik Zoologii*. 1998. V. 32. No. 14. P. 76–85 (in Russian).
18. Tembotov A.K., Shkhashamishv H.H. Animals in Kabardino-Balkaria. Nalchik: Elbrus, 1984. 191 p. (in Russian).
19. Karasyeva E.V., Tikhonova G.N., Bogomolov P.L. The USSR areal of striped field mouse (*Apodemus agrarius*) and features of the species habitats in its different parts // *Zoologicheskii zhurnal*. 1992. V. 71. No. 6. P. 106–115 (in Russian).
20. Tembotov A.K. Geography of mammals in the North Caucasus. Nalchik: Elbrus, 1972. 245 p. (in Russian).

Характеристика бактериопланктона Камских водохранилищ в летний период 2022 года

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

Е. С. Краснова, м. н. с.,

Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна Российской академии наук,
445003, Россия, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10,
e-mail: mvumansk67@gmail.com, Krasnova-eck@mail.ru

В работе дана характеристика размерно-морфологической структуры и пространственного распределения гетеротрофного бактериопланктона в Нижнекамском, Воткинском и Камском водохранилищах в августе–сентябре 2022 г. Общая численность гетеротрофного бактериопланктона в исследованных водоёмах изменялась в пределах $(1,9–8,7) \cdot 10^6$ кл./мл (в среднем $(3,8 \pm 1,2) \cdot 10^6$ кл./мл), биомасса – 44,1–190,8 мкг С/л ($91,0 \pm 29,3$ мкгС/л), что соответствует мезотрофно-эвтрофному уровню продуктивности водохранилищ. В составе бактериопланктона преобладали мелкие одиночные свободноплавающие гетеротрофные бактерии, преимущественно кокки и коккобациллы. С севера на юг вниз по течению р. Камы происходило увеличение общей численности и биомассы бактерий, и также возрастала доля агрегированных бактерий. В устьевых участках притоков численность бактерий в 1,5–2,0 раза превышала таковую на прилегающих участках водохранилища. Агрегированный бактериопланктон был преимущественно ассоциирован с частицами детрита и вносил большой вклад в общую численность бактерий в основном в устьевых участках притоков. Пикодетритные частицы постоянно присутствовали во всех пробах и по массе превосходили биомассу бактериопланктона в 2,8 раза, а их наибольшее количество обнаружено в устьях притоков. Вода во всех водохранилищах каскада соответствовала IV (загрязнённого) классу качества по численности бактериопланктона.

Ключевые слова: гетеротрофные бактерии, детрит, пространственное распределение, каскад Камских водохранилищ.

Heterotrophic bacterioplankton in the Kama reservoirs in summer 2022

© 2026. M. V. Umanskaya ORCID: 0000-0003-2097-4913

E. S. Krasnova ORCID: 0000-0002-4062-9774

Samara Federal Research Scientific Center RAS,
Institute of Ecology of Volga River Basin RAS,
10, Komzina St., Togliatti, Russia, 445003,
e-mail: mvumansk67@gmail.com, krasnova-eck@mail.ru

The paper describes the size-morphological structure and spatial distribution of heterotrophic bacterioplankton in the Nizhnekamskoe, Votkinskoe and Kamskoe Reservoirs in August – September 2022. The total abundance of heterotrophic bacterioplankton in the studied reservoirs varied within the range of $(1.91–8.74) \cdot 10^6$ cells/mL (on average $(3.8 \pm 1.2) \cdot 10^6$ cells/mL), biomass – 44.1–190.8 µg C/L (91.0 ± 29.3 µg C/L), which corresponds to the mesotrophic-eutrophic level of productivity. The composition of bacterioplankton was dominated by small single free-floating heterotrophic bacteria, mainly cocci and cocobacilli. Unicellular filamentous cells constantly present in the samples during the observation period, and were an integral component of heterotrophic bacterioplankton, despite their small abundance at most stations. In the mouth areas of the tributaries, the number of bacteria was 1.5–2.0 times higher than in the adjacent areas of the reservoirs. This may be due to the fact that mouth areas are a kind of barrier between the tributary and the reservoir, where transformation and accumulation of river flow occur, i.e. they represent ecotones characterized, among other things, by an increase in the abundance of organisms. Aggregated bacterioplankton was mainly associated with detritus particles and made a significant contribution to the total abundance of bacteria, mainly in the mouth areas of tributaries. Picodetritic particles were constantly present in all samples and exceeded the mass of bacterioplankton by 2.8 times, and their greatest number was found in the mouths of tributaries. The water in all reservoirs of the cascade corresponded to the IV (polluted) quality class in terms of the number of bacterioplankton.

Keywords: heterotrophic bacteria, detritus, spatial distribution, the Kama reservoirs' cascade.

Микроорганизмы – это одна из самых многочисленных и разнообразных групп гидробионтов, которые являются основными участниками разнообразных биогеохимических процессов в водоёмах [1–3]. Гетеротрофный бактериопланктон играет главную роль в деструкции органического вещества и является важным пищевым объектом микрозоопланктона, включая простейших [4–6], а его вклад в суммарную биомассу планктона и степень участия в планктонных пищевых сетях существенно зависят от условий среды и типа водного объекта [7]. Бактерии, обладая высокой скоростью реагирования на изменения условий среды, служат индикаторами качества вод и состояния экосистемы [8].

Детрит представляет большой интерес при исследовании экологии бактериопланктона, так как аккумулирует на своей поверхности растворённые в воде органические вещества, а за счёт значительной агрегированности бактериопланктоном служит ценным источником пищи для многих видов планктонных организмов (простейших, коловраток, ракообразных) [9]. В связи с этим изучение детрита и его структурных показателей имеет большое значение для исследования деструкционных процессов в водоёмах и свидетельствует о его существенной роли в водных экосистемах.

Цель данной работы – определить численность, биомассу и размерно-морфологическую

структуру гетеротрофного бактериопланктона Камских водохранилищ в условиях многофакторного антропогенного воздействия.

Объекты и методы исследования

Кама – крупнейший приток Волги, как по длине реки и площади бассейна, так и по водности. В настоящее время Кама представляет собой каскад из трёх водохранилищ, различающихся по времени создания, площади водосбора и морфометрическим показателям (табл. 1). В отличие от других водохранилищ каскада, большая часть водосборной территории Камского водохранилища заболочена [10]. На всех водохранилищах мелководные участки составляют существенную часть акватории (табл. 1), поэтому пробы отбирали как на глубоководных станциях, так и на мелководье (табл. 2).

Исследования проводили с 30 августа по 7 сентября 2022 г. на всём протяжении исследованных водохранилищ. Всего было отобрано и проанализировано 43 интегральные пробы воды, в том числе 10 – в Нижнекамском, 20 – в Воткинском и 13 – в Камском водохранилище. Станции были расположены как на глубоководных, так и на мелководных участках водохранилищ (табл. 2). Пробы воды на всех станциях отбирали послойно с интервалом 1 м от поверхности до дна батометром Пата-

Таблица 1 / Table 1
 Основные морфометрические характеристики водохранилищ (по [11, 12])
 Main morphometric characteristics of reservoirs (based on [11, 12])

| Показатель Indicator | Водохранилище / Reservoir | | |
|---|-------------------------------|--------------------------|--------------------|
| | Нижнекамское Nizhnekamskoe | Воткинское Votkinskoe | Камское Kamskoe |
| Годы заполнения / Years of filling | 1978 | 1961–1964 | 1954–1956 |
| Общая площадь, км ² / Total area, km ² | 1080 | 1065 | 1910 |
| Объём, км ³ / Volume, km ³ | 2,9 | 9,36 | 12,2 |
| Нормальный подпорный уровень, м Normal backwater level, m | 72 | 89 | 22 |
| Длина, км / Length, km | 270 | 360 | 350 |
| Максимальная ширина, км Maximum width, km | 15 | 9 | 14 |
| Средняя глубина, м Average depth, m | 3,3 | 8,8 | 6,4 |
| Максимальная глубина, м Maximum depth, m | 20,0 | 28,0 | 30 |
| Площадь водосбора, км ² Drainage basin, km ² | 366000 | 184000 | 168000 |
| Площадь мелководий (с глубиной до 2 м), % Area of shallow waters (with depth up to 2 m), % | 49,8 | 11,3 | 19,4 |

ласа. Интегральные пробы получали путём смешивания равного объёма воды, отобранной с каждого горизонта станции. Одновременно с отбором гидробиологических проб измеряли некоторые физико-химические показатели воды многопараметрическим зондом Aqua TROLL 500 (температура, рН, электропроводность, цветность), прозрачность по диску Секки. Отобранные пробы фиксировали раствором формалина до конечной концентрации 4 %. Для учёта бактериопланктона и детрита пробы воды концентрировали фильтрованием через мембранные нитроцеллюлозные фильтры с диаметром пор 0,2 мкм.

Общую численность бактериопланктона и количество детритных частиц определяли методом эпифлуоресцентной микроскопии (микроскоп Leica DM 5500 В, увеличение $\times 1000$) с использованием флуорохрома DAPI ("Sigma-Aldrich", Германия) [13–15]. Удельную массу клеток принимали равной единице, общую биомассу рассчитывали по [16]. Биомассу выражали в единицах органического углерода и рассчитывали, исходя из данных по содержанию углерода в клетках бактерий и частицах детрита [4, 14].

Статистическую обработку полученных результатов осуществляли с использованием программы Excel. Класс качества воды по бактериологическим показателям оценивали в соответствии с классификацией из РД 52.24.309-92.

Результаты и обсуждение

Абиотические условия. Средняя прозрачность воды по диску Секки в водохранилищах изменялась в пределах 0,8–1,9 м (табл. 2), что соответствует мезотрофно-эвтрофному уровню продуктивности [17]. Активная реакция

(рН) воды всех водохранилищ была близкой к нейтральной, различия между показателями в разных водохранилищах были выражены слабо (табл. 2). По уровню минерализации, вода исследованных водохранилищ (табл. 2) относится к средне- и умереннопресной [18]. По величине цветности Нижнекамское водохранилище является мезоолигогумозным; Воткинское и Камское – мезогумозными [18]. Цветность воды в целом снижалась от верхний Камского водохранилища к нижнему участку Нижнекамского, что связано с поступлением большого количества гуминовых соединений с заболоченной части водосборной территории Камского водохранилища [10]. В период исследования температура воды возрасла с севера на юг (табл. 2). Такое изменение температуры воды может быть связано как с широтной зональностью, так и изменением среднесуточной температуры воздуха, так как во время работы на Нижнекамском водохранилище она составляла 23,2 °С, на Воткинском – 13,9 °С, и на Камском – 8,3 °С.

Гетеротрофный бактериопланктон. Общая численность гетеротрофного бактериопланктона (ОЧБ) и его биомасса в Нижнекамском водохранилище варьировали в довольно широких пределах $(2,2-8,7) \cdot 10^6$ кл./мл и 63,5–190,8 мкг С/л, соответственно. В Воткинском водохранилище ОЧБ изменялась в пределах $(2,6-6,2) \cdot 10^6$ кл./мл, биомасса – 58,4–338,4 мкг С/л. Общая численность бактерий в Камском водохранилище колебалась от $1,9 \cdot 10^6$ до $4,7 \cdot 10^6$ кл./мл, а общая биомасса – от 44,1 до 104,6 мкг С/л. Степень изменчивости ОЧБ в водохранилищах различна: коэффициент вариации изменялся от 39,2 % в Нижнекамском до 22,5 % в Воткинском водохранилище. Средние показатели общей численности и биомассы бактериопланктона

Таблица 2 / Table 2

Физико-химическая характеристика станций отбора
Physicochemical characteristics of sampling stations

| Водохранилище Reservoir | Глубина, м Depth, m | Прозрачность, м Transparence, m | Температура, °С Temperature, °С | рН | Цветность, °Pt Color, °Pt | Электропроводность, мкСм/см Cond, μ S |
|-------------------------------|------------------------------|--|--|--------------------------|------------------------------------|--|
| Нижнекамское Nizhnekamskoe | 3,0–16 7,4 \pm 4,8 | 1,2–1,9 1,5 \pm 0,3 | 22,3–25,2 23,4 \pm 1,0 | 6,8–7,6 7,1 \pm 0,2 | 25–45 36,1 \pm 6,5 | 188–864 330 \pm 209 |
| Воткинское Votkinskoe | 2,0–22 8,3 \pm 6,5 | 0,8–1,5 1,3 \pm 0,2 | 14,6–22,3 17,8 \pm 2,0 | 6,9–7,4 7,1 \pm 0,1 | 30–50 42 \pm 5 | 181–389 299 \pm 58 |
| Камское Kamskoe | 2,0–21,5 6,3 \pm 5,9 | 0,8–1,7 1,3 \pm 0,2 | 11,2–17,9 15,5 \pm 2,0 | 7,0–7,4 7,2 \pm 0,1 | 35–50 46,8 \pm 5,6 | 290–826 400 \pm 139 |

Примечание: над чертой – min–max, под чертой – среднее значение \pm стандартное отклонение.
Note: min–max is above the line, average value \pm standard deviation is below the line.

для каждого водохранилища показаны на рисунке 1, причём в устьевых участках притоков всех водохранилищ оба показателя были выше, чем на русловых станциях. Это может быть связано с тем, что устьевые участки являются своего рода барьерами между притоком и водохранилищем, где происходят процессы трансформации и аккумуляции речного стока, т. е. представляют собой экотоны, характеризующиеся увеличением обилия организмов [19–21]. Аналогичный эффект ранее мы наблюдали в устьевой части р. Сок (Саратовское водохранилище) [23]. При этом в районе крупных промышленных центров не выявлено существенного снижения или увеличения численности или биомассы бактериопланктона.

Судя по численности бактериопланктона в исследуемый период качество воды в каскаде Камских водохранилищ соответствует IV классу (загрязнённая вода), за исключением устьевых участков исследованных притоков – V класс (грязная вода).

Детритные частицы. Детрит – постоянный компонент водных экосистем, который, наряду с бактериями и водорослями, является пищевым ресурсом для организмов более высоких трофических уровней [9]. Во всех пробах Камских водохранилищ присутствовали детритные частицы, при этом их количество было существенно ниже численности бактерий, а масса на большинстве станций выше, чем биомасса бактериопланктона (рис. 1, 2). Это

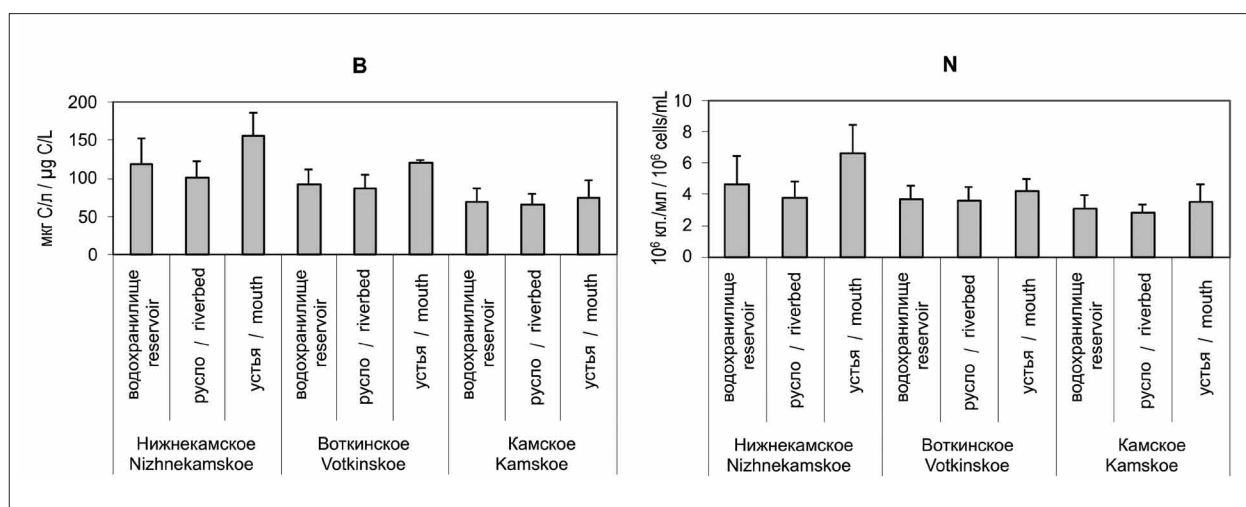


Рис. 1. Биомасса (B, мкг С/л) и численность (N, млн. кл./мл) гетеротрофных бактерий в каскаде Камских водохранилищ
 Fig. 1. Biomass (B, µg C/L) and abundance (N, $\cdot 10^6$ cells/mL) of heterotrophic bacteria in the Kama reservoirs' cascade

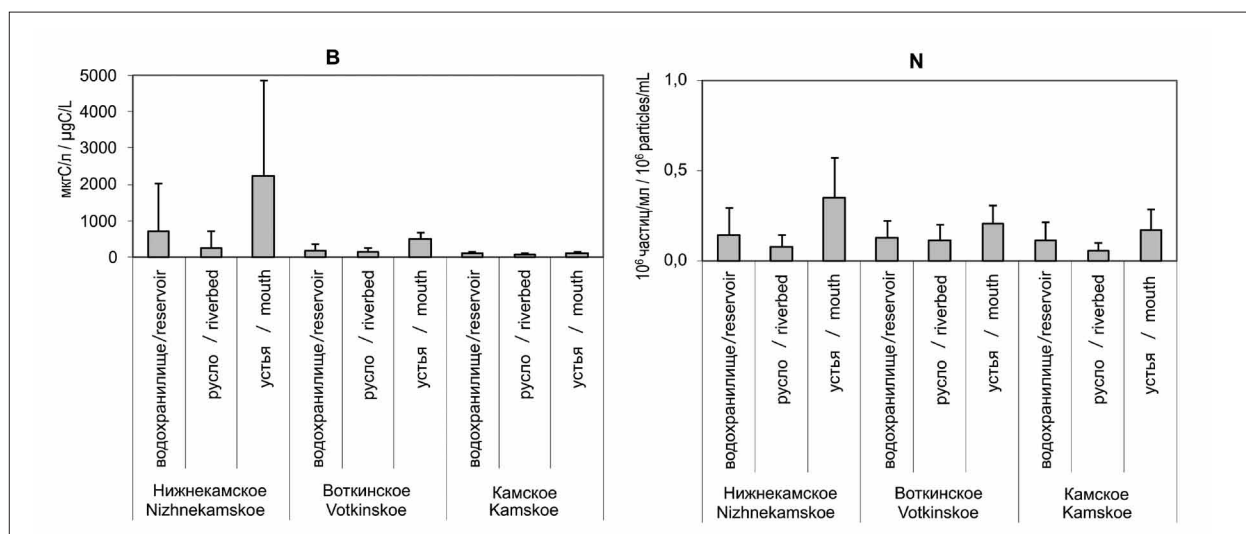


Рис. 2. Масса (B, мкг С/л) и количество (N, $\cdot 10^6$ частиц/мл) детритных частиц в исследованных водохранилищах
 Fig. 2. Weight (B, µg C/L) and quantity (N, $\cdot 10^6$ particles/mL) of detrital particles in the studied reservoirs

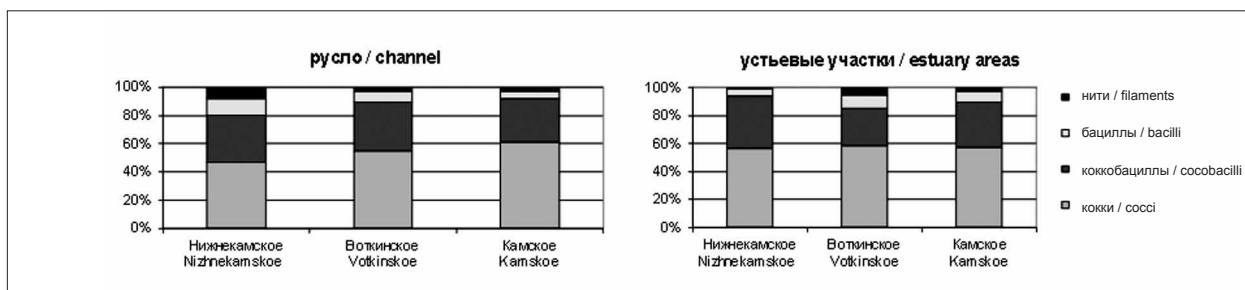


Рис. 3. Вклад отдельных морфологических групп клеток в общую численность гетеротрофного бактериопланктона, в % по биообъёму
Fig. 3. The contribution of individual morphological groups of heterotrophic bacterioplankton to the total abundance, in % by biovolume

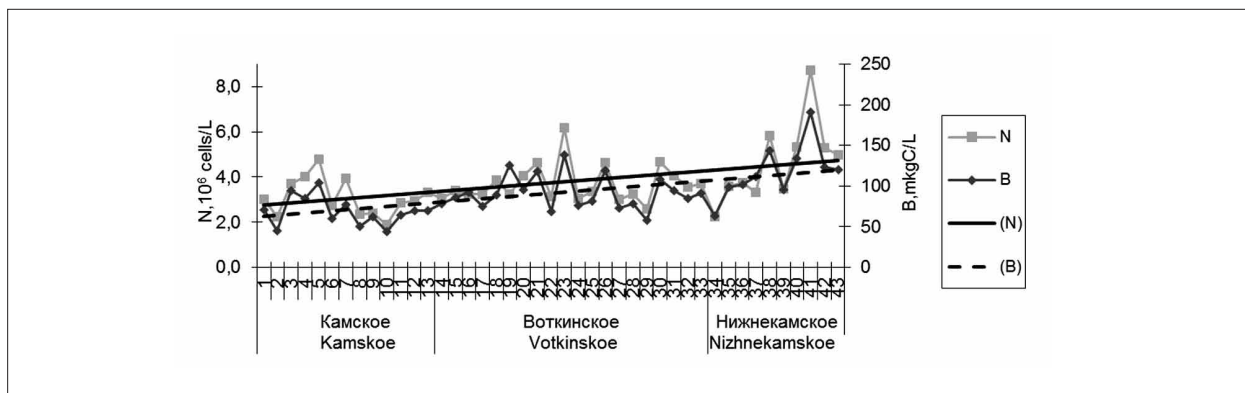


Рис. 4. Численность (N, млн. кл./мл) и биомасса (B, мкг С/л) гетеротрофных бактерий на станциях отбора. Линейный тренд для численности (N) и биомассы (B)
Fig. 4. Abundance (N, $\cdot 10^6$ cells/mL) and biomass (B, $\mu\text{g C/L}$) of heterotrophic bacteria at sampling stations. Linear trend for abundance (N) and biomass (B)

связано с тем, что размеры детритных частиц, как правило, превышают размеры гетеротрофных бактерий. Размер детритных частиц (рассчитанный в соответствии с [15]) в каскаде Камских водохранилищ изменялся от 0,61 до 29,14 мкм, в среднем же составлял 2,63 мкм. Максимальное количество детритных частиц отмечалось в Нижнекамском водохранилище (рис. 2), куда они в большом количестве попадают из притоков.

Размерно-морфологическая структура бактериопланктона. Размер и форма бактериальных клеток – важный показатель, отражающий взаимоотношения по типу хищник–жертва между бактериями и их основными потребителями – простейшими в водных экосистемах [23]. В условиях сильного трофического давления простейших в сообществе начинают доминировать устойчивые к выеданию морфотипы, такие как мелкие клетки, крупные агрегаты и нити [24–27].

Размеры бактериальных клеток в исследованных водохранилищах варьировали от 0,3 до 100 мкм по длине и от 0,020 до 12,8 мкм³ по объёму. В сообществе бактериопланктона всех

водохранилищ доминировали кокки и коккобациллы (рис. 3). Одноклеточные нитевидные клетки являлись неотъемлемой составляющей гетеротрофного бактериопланктона, несмотря на их малую численность на большей части станций (рис. 3). Более половины ОЧБ водохранилищ (~63 %) формировалось за счёт мелких клеток (со средней длиной 0,58 мкм и объёмом 0,07 мкм³), устойчивых к поеданию простейшими, что может свидетельствовать о значительном прессе последних.

Агрегированный бактериопланктон в основном был представлен клетками, ассоциированными с частицами детрита и, значительно реже, с крупными клетками фитопланктона. На собственно водохранилищных станциях его доля составляла $3,5 \pm 2,3$ % ОЧБ. В устьях рек Обва, Тулва, Ик и Иж, более 90 % бактерий было агрегировано с детритом, а в устьях прочих притоков средняя доля агрегированного планктона составляла около 5 %. Надо отметить, что, по сравнению с соседними русловыми станциями, на всех устьевых станциях доля агрегированного планктона была более высокой, что вполне соответствует повы-

шенному содержанию детрита в них (рис. 2). Единственное исключение – русловая ст. 79 у г. Оса (Воткинское водохранилище) в районе паромной переправы. Около 90 % бактерий здесь были ассоциированы с частицами детрита, но причины такой аномалии не ясны.

Исследуемые водохранилища характеризуются высоким уровнем развития бактериопланктона. Мы предполагаем, что это может быть связано со временем отбора проб (конец лета – начало осени), когда для бактерий доступно большое количество растворённых органических веществ, образовавшихся в период летнего максимума в развитии фитопланктона [4]. Наибольшая ОЧБ, биомасса, средний объём клеток и процент агрегированных бактерий были зарегистрированы в Нижнекамском водохранилище. В каскаде Камских водохранилищ отмечено увеличение численности и биомассы бактерий с севера на юг вниз по течению реки (рис. 4). Подобный характер изменения численности в каскаде Камских водохранилищ был зафиксирован в 2014 и 2016 гг. для планктонных инфузорий [28].

Заключение

В каскаде Камских водохранилищ в 2022 г. были исследованы станции с широким диапазоном абиотических условий и антропогенной нагрузки. Общая численность и биомасса бактерий варьировали в пределах $(1,9-8,7) \cdot 10^6$ и $44,1-190,8$ мкг С/л, соответствующих мезоэвтрофному уровню продуктивности. Оба показателя в общем увеличивались в широтном направлении с севера на юг вниз по течению реки. Изменения размерно-морфологической структуры бактериопланктона Камских водохранилищ были разнонаправленными и представляли собой результат совместного воздействия различных комплексов антропогенных и природных факторов на каждой отдельной станции. В целом, полученные результаты указывают на то, что воды притоков оказывают большее влияние на численность и размерную структуру бактериопланктона, чем промышленные источники загрязнения (крупные города, переправы, гидротехнические сооружения). В составе бактериопланктона Камских водохранилищ в исследованный период преобладали мелкие одиночные свободноплавающие гетеротрофные бактерии, устойчивые к выеданию простейшими, что свидетельствует о значительном прессе последних. Пикодетритные частицы, несмотря на небольшую численность, присутствовали в

большинстве исследованных проб, но основное их поступление в водохранилища происходило с водами притоков. Вода всех водохранилищ каскада соответствовала IV классу качества (загрязнённая вода) по численности бактериопланктона.

Отдельно авторы выражают признательность за помощь в отборе проб с. н. с. С. В. Быковой (Институт экологии Волжского бассейна РАН) и с. н. с. Н. Г. Тарасовой (Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина) за любезно предоставленные данные физико-химических параметров.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Института экологии Волжского бассейна-филиал СамНЦ РАН № 1024032600218-3-1.6.20.

Литература

1. Драбкова В.Г. Зональное изменение интенсивности микробиологических процессов в озёрах. Л.: Наука, 1981. 212 с.
2. Романенко В.И. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества во внутренних водоёмах. Л.: Наука, 1985. 295 с.
3. Romanenko A.V. Seasonal dynamics of the structural and functional organization of heterotrophic bacterioplankton in the mouth area of the Small Il'd River // Inland Water Biol. 2023. V. 16. Suppl. 1. P. 67–74. doi: 10.1134/S199508292307012X
4. Копылов А.И., Косолапов Д.Б. Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги. М.: Изд-во СГУ, 2008. 377 с.
5. Callieri C., Karjalainen S.M., Passoni S. Grazing by ciliates and heterotrophic nanoflagellates on picocyanobacteria in Lago Maggiore, Italy // J. Plankton Res. 2002. V. 24. No. 8. P. 785–796. doi: 10.1093/plankt/24.8.785
6. Gilbert J.J. Food niches of planktonic rotifers: diversification and implications // Limnol. Oceanogr. 2022. V. 67. No. 10. P. 2218–2251. doi: 10.1002/lno.12199
7. Raven J.A. The twelfth Tansley Lecture. Small is beautiful: The picophytoplankton // Funct. Ecol. 1998. V. 12. No. 4. P. 503–513. doi: 10.1046/j.1365-2435.1998.00233.x
8. Олейник Г.Н., Юришинец В.И., Старосила Е.В. Бактериопланктон и бактериобентос как биологические индикаторы состояния водных экосистем // Гидробиол. журн. 2010. Т. 46. № 6. С. 38–51.
9. Садчиков А.П., Остроумов С.А. Экологическое и трофическое значение детрита в водоёмах // Рыбное хозяйство. 2017. № 2. С. 65–69.
10. Комлев А.М. Реки Пермского края. Пермь: ООО Алекс-Пресс, 2011. 144 с.

11. Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник) / Отв. ред. Г.С. Розенберг, Л.А. Выхристюк. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2008. 123 с.

12. Правила использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Кама. М.: Росводресурсы, 2014. 132 с.

13. Porter K.G., Feig Y.S. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora // *Limnol. Oceanogr.* 1980. V. 25. No. 5. P. 943–948. doi: 10.4319/lo.1980.25.5.0943

14. Mostajir B., Dolan J.R., Rassoulzadegan F. A simple method for the quantification of a class of labile marine pico- and nano-sized detritus: DAPI Yellow Particles (DYP) // *Aquat. Microb. Ecol.* 1995. V. 9. P. 259–266. doi: 10.3354/ame009259

15. Chateauvert C.A., Lesack L.F.W., Bothwell M.L. Abundance and patterns of transparent exopolymer particles (TEP) in Arctic floodplain lakes of the Mackenzie River Delta // *J. Geophys. Res. G: Biogeosci.* 2012. V. 117. No. G4. Article No. G04013. doi: 10.1029/2012JG002132

16. Кузнецов С.И., Дубинина Г.А. Методы изучения водных микроорганизмов. М.: Наука, 1989. 288 с.

17. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1977. V. 22. No. 2. P. 361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361

18. Китаев С.П. Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 395 с.

19. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.

20. Гидроэкология устьевых областей притоков равнинного водохранилища / ред. А.В. Крылов, А.И. Цветков, С.Э. Болотов. Ярославль: Филигрань, 2015. 466 с.

21. Законнов В.В., Поддубный С.А., Законнова А.В., Касьянова В.В. Осадкообразование в зонах переменного подпора водохранилищ Волжского каскада // *Водные ресурсы.* 2010. Т. 37. № 4. С. 425–433.

22. Уманская М.В., Рахуба А.В., Краснова Е.С. Влияние суточного гидрологического режима на бактериопланктон устьевой области р. Сок // *Проблемы изучения краевых структур биоценозов: Мат. 3-й Междунар. конф. Саратов, 2–4 октября 2012 г. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 2012. С. 123–126.*

23. Pernthaler J., Sattler B., Šimek K., Schwarzenbacher A., Psenner R. Top-down effects on the size-biomass distribution of a freshwater bacterioplankton community // *Aquat. Microb. Ecol.* 1996. V. 10. No. 3. P. 255–263. doi: 10.3354/ame010255

24. Jürgens K. Predation on bacteria and bacterial resistance mechanisms: comparative aspects among different predator groups in aquatic systems // *Predatory Prokaryotes. Microbiology Monographs. V. 4.* / Ed. E. Jurkevitch. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 57–92. doi: 10.1007/7171_053

25. Salcher M.M. Same same but different: ecological niche partitioning of planktonic freshwater prokaryotes //

J. Limnol. 2014. V. 73. No. 1. P. 74–87. doi: 10.4081/jlimnol.2014.813

26. Жариков В.В., Горбунов М.Ю., Уманская М.В., Быкова С.В., Шерышева Н.Г. Экология сообществ бактерий и свободноживущих инфузорий малых водоёмов Самарской Луки. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2007. 193 с.

27. Kuznetsova E.V., Kosolapov D.B., Krylov A.V. Changes in size-morphological structure of bacterioplankton in freshwater environments of Svalbard // *Contemp. Probl. Ecol.* 2022. V. 15. No. 2. P. 139–146. doi: 10.1134/S199542552202007X

28. Bykova S.V. Free-living ciliates of the deepwater part of the Kama Reservoirs // *Inland Water Biol.* 2023. V. 16. No. 2. P. 237–254. doi: 10.1134/S1995082923020037

References

1. Drabkova V.G. Zonal change in the intensity of microbiological processes in lakes. Leningrad: Nauka, 1981. 212 p. (in Russian).

2. Romanenko V.I. Microbial processes of production and destruction of organic matter in inland aquatic environments. Leningrad: Nauka, 1985. 295 p. (in Russian).

3. Romanenko A.V. Seasonal dynamics of the structural and functional organization of heterotrophic bacterioplankton in the mouth area of the Small Il'd River // *Inland Water Biol.* 2023. V. 16. Suppl. 1. P. 67–74. doi: 10.1134/S199508292307012X

4. Kopylov A.I., Kosolapov D.B. Bacterioplankton of the Upper and Middle Volga reservoirs. Moskva: Izdatelstvo SGU, 2008. 377 p. (in Russian).

5. Callieri C., Karjalainen S.M., Passoni S. Grazing by ciliates and heterotrophic nanoflagellates on picocyanobacteria in Lago Maggiore, Italy // *J. Plankton Res.* 2002. V. 24. No. 8. P. 785–796. doi: 10.1093/plankt/24.8.785

6. Gilbert J.J. Food niches of planktonic rotifers: Diversification and implications // *Limnol. Oceanogr.* 2022. V. 67. No. 10. P. 2218–2251. doi: 10.1002/lno.12199

7. Raven J.A. The twelfth Tansley Lecture. Small is beautiful: The picophytoplankton // *Funct. Ecol.* 1998. V. 12. No. 4. P. 503–513. doi: 10.1046/j.1365-2435.1998.00233.x

8. Oleynik G.N., Yurishinets V.I., Starosila E.V. Bacterioplankton and bacteriobenthos as biological indicators of the aquatic ecosystem state // *Hydrobiological journal.* 2010. V. 46. No. 6. P. 38–51 (in Russian).

9. Sadchikov A.P., Ostroumov S.A. Ecological and trophic role of detritus in water bodies // *Rybnoe khozyaystvo.* 2017. No. 2. P. 65–68 (in Russian).

10. Komlev A.M. Perm Krai rivers. Perm: Alex-Press LLC, 2011. 144 p. (in Russian).

11. Kuibyshev reservoir (scientific information guide) / Eds. G.S. Rozenberg, L.A. Vykhristyuk. Togliatti: IEVB RAN, 2008. 123 p. (in Russian).

12. Rules for the use of water resources of the Nizhnekamsk reservoir on the Kama River. Moskva: Rosvodresursy, 2014. 132 p. (in Russian).

13. Porter K.G., Feig Y.S. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora // *Limnol. Oceanogr.* 1980. V. 25. No. 5. P. 943–948. doi: 10.4319/lo.1980.25.5.0943
14. Mostajir B., Dolan J.R., Rassoulzadegan F. A simple method for the quantification of a class of labile marine pico- and nano-sized detritus: DAPI Yellow Particles (DYP) // *Aquat. Microb. Ecol.* 1995. V. 9. P. 259–266. doi: 10.3354/ame009259
15. Chateauvert C.A., Lesack L.F.W., Bothwell M.L. Abundance and patterns of transparent exopolymer particles (TEP) in Arctic floodplain lakes of the Mackenzie River Delta // *J. Geophys. Res. G: Biogeosci.* 2012. V. 117. No. G4. Article No. G04013. doi: 10.1029/2012JG002132
16. Kuznetsov S.I., Dubinina G.A. Methods of studying aquatic microorganisms. Moskva: Nauka, 1989. 288 p. (in Russian)
17. Carlson R.E. A trophic state index for lakes // *Limnol. Oceanogr.* 1977. V. 22. No. 2. P. 361–369. doi: 10.4319/lo.1977.22.2.0361
18. Kitaev S.P. Basic general limnology for hydrobiologists and ichthyologists. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the RAS, 2007. 395 p. (in Russian).
19. Odum Yu. Fundamentals of ecology. Moskva: Mir, 1975. 740 p. (in Russian).
20. Hydroecology of lowland water reservoir tributaries' mouth / Ed. A.V. Krylov, A.I. Tsvetkov, S.E. Bolotov. Yaroslavl: Filigran Publ., 2015. 466 p. (in Russian).
21. Zakonnov V.V., Poddubnyy S.A., Zakonnova A.V., Kas'yanova V.V. Sedimentation in variable-backwater zones of Volga chain reservoirs // *Water Resour.* 2010. V. 37. No. 4. P. 462–470. doi: 10.1134/S0097807810040056
22. Umanskaya M.V., Rakhuba A.V., Krasnova E.S. Daily hydrological regime effect on bacterioplankton of the mouth area of the Sok River // *Problems of studying marginal structures of biocenoses: materialy 3 Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii.* Saratov, October 2–4, 2012. Saratov: of Saratov University Publ., 2012. P. 123–126 (in Russian).
23. Pernthaler J., Sattler B., Šimek K., Schwarzenbacher A., Psenner R. Top-down effects on the size-biomass distribution of a freshwater bacterioplankton community // *Aquat. Microb. Ecol.* 1996. V. 10. No. 3. P. 255–263. doi: 10.3354/ame010255
24. Jürgens K. Predation on bacteria and bacterial resistance mechanisms: comparative aspects among different predator groups in aquatic systems // *Predatory Prokaryotes. Microbiology Monographs.* V. 4. / Ed. E. Jurkevitch. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. P. 57–92. doi: 10.1007/7171_053
25. Salcher M.M. Same same but different: ecological niche partitioning of planktonic freshwater prokaryotes // *J. Limnol.* 2014. V. 73. No. 1. P. 74–87. doi: 10.4081/jlimnol.2014.813
26. Zharikov V.V., Gorbunov M.Yu., Umanskaya M.V., Bykova S.V., Sherysheva N.G. Ecological features of bacterioplankton development in Samara Luka small eutrophic lakes. Tolyatti: IEVB RAN, 2007. 193 p. (in Russian).
27. Kuznetsova E.V., Kosolapov D.B., Krylov A.V. Changes in size-morphological structure of bacterioplankton in freshwater environments of Svalbard // *Contemp. Probl. Ecol.* 2022. V. 15. No. 2. P. 139–146. doi: 10.1134/S199542552202007X
28. Bykova S.V. Free-living ciliates of the deepwater part of the Kama Reservoirs // *Inland Water Biol.* 2023. V. 16. No. 2. P. 237–254. doi: 10.1134/S1995082923020037

**Состояние, перспективы развития системы контроля
и мониторинга атмосферного воздуха в регионе**

© 2026. М. Х. Хето¹, аспирант,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с.,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: mihemedhito@gmail.com, ecolab2@gmail.com

В статье описываются структура, динамика и основные проблемы системы контроля атмосферного воздуха в Российской Федерации с акцентом на региональную практику Кировской области. Проведён анализ законодательной базы экологического контроля, технической инфраструктуры, результатов по выбросам загрязняющих веществ (ЗВ) за период 2014–2024 гг. Для анализа состояния и перспектив развития системы контроля и мониторинга атмосферного воздуха использованы данные Роспотребнадзора, Гидрометеорологической службы России, материалы региональных экологических докладов за период 2014–2024 гг. «О состоянии окружающей среды Кировской области», законодательная и нормативно-правовая база по данному направлению. Проанализирован перечень загрязняющих атмосферный воздух веществ, отслеживаемых природоохранными органами региона, который составляет 103 компонента. Из них соединений I класса опасности – 10 (9,7 % общего количества отслеживаемых ЗВ), II класса – 32 (31,1 %), III класса – 40 (38,8 %), IV класса – 18 (17,5 %), у трёх (2,9 %) соединений не установлен класс опасности. На автотранспорт приходится от 45 до 50 % выбросов ЗВ в атмосферный воздух, однако доля выбросов от мобильных источников постепенно снижается из-за роста числа газомоторных и электрических автомобилей. Общий уровень загрязнения атмосферного воздуха на территории Кировской области и областного центра г. Кирова остаётся низким по сравнению со средними по России. Предложены направления обновления системы мониторинга атмосферного воздуха в городской среде.

Ключевые слова: атмосферный воздух, экологический мониторинг, контроль загрязнения, город Киров, Кировская область, нормативно-правовая база.

**Status and prospects for the development
of regional air control and monitoring systems**

© 2026. M. H. Kheto¹ ORCID: 0009-0001-7138-4203⁹
T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047⁹
N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760⁹
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: mihemedhito@gmail.com, ecolab2@gmail.com

The article describes the structure, dynamics, and main problems of the air control system in the Russian Federation, with a focus on the Kirov Oblast regional practice. The article analyzes the legislative framework for environmental control, the technical infrastructure, and the results of emissions for 2014–2024. The article also proposes directions for updating the atmospheric air monitoring system. To analyze the state and prospects for the development of the atmospheric air control and monitoring system, we used data from Rosпотребнадзор, the Russian Hydrometeorological Service, regional environmental reports for the period 2014–2024 “On the State of the Environment in the Kirov Region”, and the legislative and regulatory framework in this area. The list of air pollutants monitored by the environmental authori-

ties of the region, which includes 103 components, has been analyzed. Of these, 10 compounds belong to the I class of hazard (9.7 % of the total number of monitored pollutants), 32 belong to the II class (31.1 %), 40 belong to the III class (39.8 %), 18 belong to the IV class (17.5 %), and a number of compounds have not been assigned a class of hazard (2.9 %). 45–50 % of air pollution emissions are caused by motor vehicles, but the share of emissions from mobile sources is gradually decreasing due to the growing number of gas-powered and electric vehicles. The overall level of air pollution in the Kirov Region and the regional capital, Kirov, remains low compared to the national average. The article proposes ways to update the air monitoring system.

Keywords: atmospheric air, environmental monitoring, pollution control, Kirov city, Kirov Oblast, regulatory framework.

Атмосферный воздух является ключевым компонентом окружающей среды (ОС), непосредственно влияющим на здоровье населения и устойчивость экосистем. В условиях растущей урбанизации, промышленного развития и изменения климата вопросы мониторинга состояния атмосферного воздуха приобрели огромное значение и стали одним из важнейших инструментов экологического контроля. Мониторинг состояния атмосферного воздуха позволяет выявить источники загрязнения, оценить степень воздействия загрязняющих веществ (ЗВ) на природные среды и здоровье человека, принять соответствующие управленческие решения. В России, где промышленные предприятия, транспорт и природные факторы оказывают значительное влияние на состояние атмосферного воздуха, система контроля играет ключевую роль в обеспечении экологической безопасности и здоровья населения. В ряде регионов страны созданы системы комплексного экологического мониторинга. На большинстве промышленных предприятий организован производственный контроль источников загрязнения и экологический мониторинг на территориях санитарно-защитных зон (СЗЗ), закреплённых за предприятием. В целом, несмотря на развитую инфраструктуру системы экологического мониторинга на федеральном, региональном и локальном уровнях, она сталкивается с рядом проблем, например, неравномерным охватом системой мониторинга территорий субъектов Российской Федерации (РФ), различиями в методах измерений, использовании современных технологий контроля и мониторинга.

Актуальность данного исследования заключается в необходимости совершенствования региональных систем мониторинга, обеспечивающих получение достоверной и своевременной информации о состоянии воздушной среды. Кировская область, регион с развитой промышленной, химической и строительной инфраструктурой, с большими объёмами производства сельскохозяйственной продукции, с широкой сетью различного вида

транспортных магистралей (автомобильного, авиационного, железнодорожного), с достаточно высокой техногенной нагрузкой на городские территории, в том числе областного центра, безусловно, нуждается в развитой инфраструктуре по организации постоянно действующей системы комплексного экологического контроля и мониторинга.

Целью данной исследовательской работы является анализ текущего состояния по организации экологического мониторинга атмосферного воздуха в регионе и разработка рекомендаций по совершенствованию системы экологического мониторинга в контексте современных экологических и технологических требований.

Объекты и методы исследования

Проанализирована нормативно-правовая база по оценке состояния, контролю и мониторингу атмосферного воздуха. Нормативной базой для глобального экологического мониторинга является Конвенция Организации Объединённых Наций об изменении климата и программа ЮНЕП по глобальной системе экологического мониторинга. Глобальный мониторинг осуществляется с помощью наблюдательных станций, расположенных в разных частях света, путём обмена данными, получаемыми разными странами с целью мониторинга состояния ОС и происходящих в ней изменений.

Система экологического мониторинга в РФ регулируется Федеральным законом № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды», а также Федеральным законом № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха». В данном направлении по линии Минприроды РФ, Росстата, Росстандарта, Главного государственного санитарного врача РФ принят ряд приказов, постановлений и информативных актов:

– Приказ Минприроды России от 12.05.1994 № 138 «О создании экспериментальных региональных систем Единой Государственной системы экологического мониторинга (ЕГСЭМ)»;

– Положение о единой государственной системе экологического мониторинга; утверждено приказом Министра охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ от 9 февраля 1995 г. № 49;

– Постановление Правительства РФ «Об организации и осуществлении государственного мониторинга окружающей среды (государственного экологического мониторинга)» от 31.03.2003 № 177;

– Приказ Минприроды РФ «Об утверждении порядка представления информации о неблагоприятных метеорологических условиях, требований к составу и содержанию такой информации, порядка её опубликования и предоставления заинтересованным лицам» от 17.11.2011 № 899;

– Приказ Минприроды России «Об утверждении методов расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» от 06.06.2017 № 273;

– Приказ Минприроды России «Об утверждении Правил эксплуатации установок очистки газа» от 15.09.2017 № 498;

– Приказ Росстата «Об утверждении статистического инструментария для организации Федеральной службой по надзору в сфере природопользования федерального статистического наблюдения за охраной атмосферного воздуха» от 08.11.2018 № 664;

– Приказ Минприроды России «Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий» от 28.11.2019 № 814;

– Приказ Минприроды России «Об утверждении Порядка проведения инвентаризации стационарных источников и выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, корректировки её данных, документирования и хранения данных, полученных в результате проведения такой инвентаризации и корректировки» от 19.11.2021 № 871;

– Постановление Главного государственного санитарного врача РФ «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» от 28.01.2021 № 2;

– Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды и признании

утратившими силу некоторых Постановлений Правительства РФ» от 20.10.2023 № 2909-р.

Наряду с этим, для обеспечения экологического контроля и мониторинга атмосферного воздуха разработаны и утверждены на федеральном уровне ряд руководящих документов и госстандартов:

– ГОСТ 17.2.4.02-81 (СТ СЭВ 2598-80).

Охрана природы. Атмосфера. Общие требования к методам определения загрязняющих веществ;

– ГОСТ Р 8.589-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Контроль загрязнения окружающей природной среды. Метрологическое обеспечение. Основные положения;

– РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы;

– РД 52.04.667-2005. Руководящий документ. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию.

Кроме того, в каждом регионе РФ приняты соответствующие нормативные документы с целью правового обеспечения экологического контроля и мониторинга атмосферного воздуха. Правительством Кировской области разработаны и приняты:

– Закон Кировской области «Об охране окружающей среды на территории Кировской области» от 23.11.2006 № 55-30;

– Закон Кировской области «Об охране атмосферного воздуха на территории Кировской области» от 12.11.2008, № 299-30 (ред. 05.05.2025);

– Постановление Правительства Кировской области «Об утверждении положения о региональном государственном экологическом надзоре, осуществляемом на территории Кировской области» от 06.10.2017 № 22-П;

– Постановление Правительства Кировской области «Об утверждении Порядка проведения работ по регулированию выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий на территории Кировской области» от 21.01.2021 № 21-п.

В научной литературе существует несколько классификаций экологического мониторинга, основанных на методах мониторинга, объектах контроля, месте и целях проведения мониторинга. Классификация по пространственному охвату включает: глобальный, национальный (государственный)

мониторинг, региональный и локальный) [1–5]; по объектам наблюдения: мониторинг атмосферного воздуха, почв, водных объектов, растительного и животного мира) [5, 6]; по методам и технологиям: дистанционный, лабораторный (методы физико-химического и биологического анализа) [7, 8].

Научные исследования в области экологического мониторинга атмосферного воздуха сосредоточены на вопросах автоматизации мониторинга, биоиндикации, дистанционного зондирования и оценки рисков [2, 7–10]. В последние годы возрос интерес к интеграции данных различных ведомств в единые цифровые платформы и участию общественности в экологическом контроле.

Мониторинг атмосферного воздуха включает отбор проб, измерения и анализ широкого спектра показателей, таких как основные ЗВ (оксиды азота, серы, диоксид углерода, монооксид углерода, взвешенные твёрдые частицы), токсичные вещества (бенз(а)-пирен, формальдегид, нефтепродукты, тяжёлые металлы и другие). При мониторинге атмосферного воздуха используется широкий спектр исследовательских подходов и методов, включая физические, химические, биологические и дистанционные методы исследования, с использованием современных приборов и оборудования для анализа проб в лабораторных и полевых условиях, стационарные и мобильные станции мониторинга. Внедряются современные оперативные системы мониторинга с использованием спутниковых систем и беспилотных летательных аппаратов, оснащённых различными датчиками, такими как датчики и газоанализаторы для измерения твёрдых частиц и концентраций различных ЗВ в атмосферном воздухе с применением спектроскопии и электрохимических сенсоров. В биологическом мониторинге при оценке загрязнения атмосферного воздуха используются методы биоиндикации и биологического анализа, выявляются индикаторные виды растений и животных. В качестве индикаторов атмосферного загрязнения используются лишайники, хвоя сосны обыкновенной, снеговой покров [7]. В дистанционном мониторинге используются различные методы передачи данных: спутники, беспилотные летательные аппараты, сотовая связь, а также возможна проводная связь в стационарных системах [9, 10].

Экологический мониторинг в Кировской области проводится в рамках единой системы государственного экологического

мониторинга, направленной на обеспечение юридических лиц и общественности данными о состоянии ОС, принятие решений в области охраны ОС.

Основными объектами экологического контроля и мониторинга в Кировской области являются: производственный (объектовый) контроль и мониторинг, санитарно-эпидемиологический контроль и социально-гигиенический мониторинг, гидрометеорологический мониторинг, государственный экологический мониторинг.

Производственный мониторинг. Предприятия химической промышленности, деревообрабатывающие предприятия, тепло- и электростанции, различные виды транспорта оказывают существенное влияние на состояние атмосферного воздуха в регионе. Это требует проведения регулярного контроля и мониторинга на источниках выбросов ЗВ в атмосферу, анализа состояния водоёмов и почв вблизи площадок таких предприятий. Производственный мониторинг направлен на обеспечение экологической безопасности и соблюдение установленных стандартов в области охраны труда. Показатели контроля и мониторинга должны отслеживаться на всех источниках выбросов в производственной зоне, на промплощадке и на границе СЗЗ, как в непрерывном автоматическом режиме, так и передвижными лабораториями, причём с большей частотой отбора и анализа проб. Кроме того, предприятия, владеющие опасными объектами, обязаны представлять в местный орган Роспотребнадзора ежегодный отчёт о проведённых мероприятиях по контролю и мониторингу. Процесс производственного мониторинга осуществляется специализированными сертифицированными экологическими организациями, которые предоставляют услуги по мониторингу состояния воздуха, воды и почвы, а также оценке воздействия выбросов и отходов на ОС [11].

Санитарно-эпидемиологический контроль и социально-гигиенический мониторинг. Проводится с целью оценки и прогнозирования состояния ОС, выявления взаимосвязи между здоровьем населения и состоянием ОС. Санитарно-эпидемиологический контроль организуется управлением Роспотребнадзора по Кировской области и включает в себя санитарно-гигиенический мониторинг, организацию процессов санитарно-эпидемиологического контроля и соблюдения санитарного законодательства, изучение исходного состояния здоровья населения. Кро-

ме того, в его функцию входит разъяснение причин возникновения и распространения инфекционных заболеваний, выявление необходимости проведения профилактических мероприятий, а также оценка и контроль качества питьевой воды, надзор и контроль безопасности пищевых продуктов.

Гидрометеорологический мониторинг. Это государственная система мониторинга отслеживания и измерения показателей в области гидрометеорологии и смежных областях мониторинга ОС и загрязнения природных сред. Эти процессы регулируются Службой гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды (Росгидромет), которая подчиняется Министерству природных ресурсов и экологии РФ. Гидрометеорологический мониторинг Кировской области осуществляется Кировским центром по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Кировский ЦГМС) – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Верхне-Волжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Среди его задач – сбор климатических данных (температура, осадки, влажность), данных о загрязнении воздуха, которые используются для прогнозирования и оценки загрязнения.

Экологический мониторинг. Министерство охраны окружающей среды Кировской области участвует в разработке и реализации государственных программ в области охраны ОС, природопользования и обеспечения экологической безопасности, включая мониторинг состояния атмосферного воздуха, обращение с отходами, охрану водных объектов, а также информирование общественности региона о состоянии ОС путём ежегодного выпуска региональных докладов «О состоянии окружающей среды Кировской области». Оценка качества воздуха проводится с использованием сетей автоматических станций, а также задействованы мобильные лаборатории, специализирующиеся на измерении качества воздуха на открытых площадках, транспортных магистралях и на перекрёстках улиц [12]. Участвуют в проведении экологического мониторинга природных сред и объектов учёные НИИ Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого и НИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова, Вятского государственного университета и Вятского агротехнологического университета, а также Кировский филиал ФГБУ «РосАгрохимслужба», который предоставляет услуги по обследованию почв, мониторингу плодородия и консультированию

в сфере сельского хозяйства области, имея аккредитованную лабораторию и опытных специалистов.

Результаты и обсуждение

Мониторинг состояния атмосферного воздуха на территории региона. Ключевыми объектами любой программы экологического мониторинга на региональном уровне являются: мониторинг качества атмосферного воздуха и шумового загрязнения, мониторинг загрязнения водных объектов для поддержания качества питьевой воды и защиты экосистем рек и озёр, мониторинг загрязнения почв для предотвращения токсического воздействия на людей, растения и животных, мониторинг лесных систем с целью восстановления лесов, защиты их от вредителей и болезней.

Наиболее важным объектом мониторинга городской среды в любом регионе является состояние атмосферного воздуха, которое зависит от воздействия на него множества различных факторов: выбросы промышленных и химических предприятий, тепло- и электростанций, автомобильного, железнодорожного транспорта, жилого отопительного сектора, ряда предприятий социально-бытового сектора и др. Атмосферный воздух эффективно способствует быстрому переносу ЗВ ветром, способствует распространению негативного воздействия ЗВ на более широкие пространства и, тем самым, влияет на здоровье человека, воздействует на флору и фауну, экосистемы и биологическое разнообразие [13–15]. Кроме того, некоторые загрязнители воздуха, такие как углекислый газ и метан, вносят непосредственный вклад в глобальное потепление [16].

В связи с этим программа мониторинга атмосферного воздуха городской среды должна включать оптимальный перечень ЗВ, специфичных для данной городской агломерации; карту мониторинга с нанесёнными пунктами, постами, точками и ключевыми участками мониторинга, расположенными в наиболее информативных и доступных местах контроля и мониторинга. Особым разделом программы должен быть установленный регламент отбора проб и их анализа, а также перечень методик, используемых для определения всего спектра показателей контроля и мониторинга.

Для разработки программы мониторинга атмосферного воздуха в г. Кирове нами проведён анализ перечня ЗВ в атмосферном воздухе, отслеживаемых природоохранными органами региона (рис. 1).

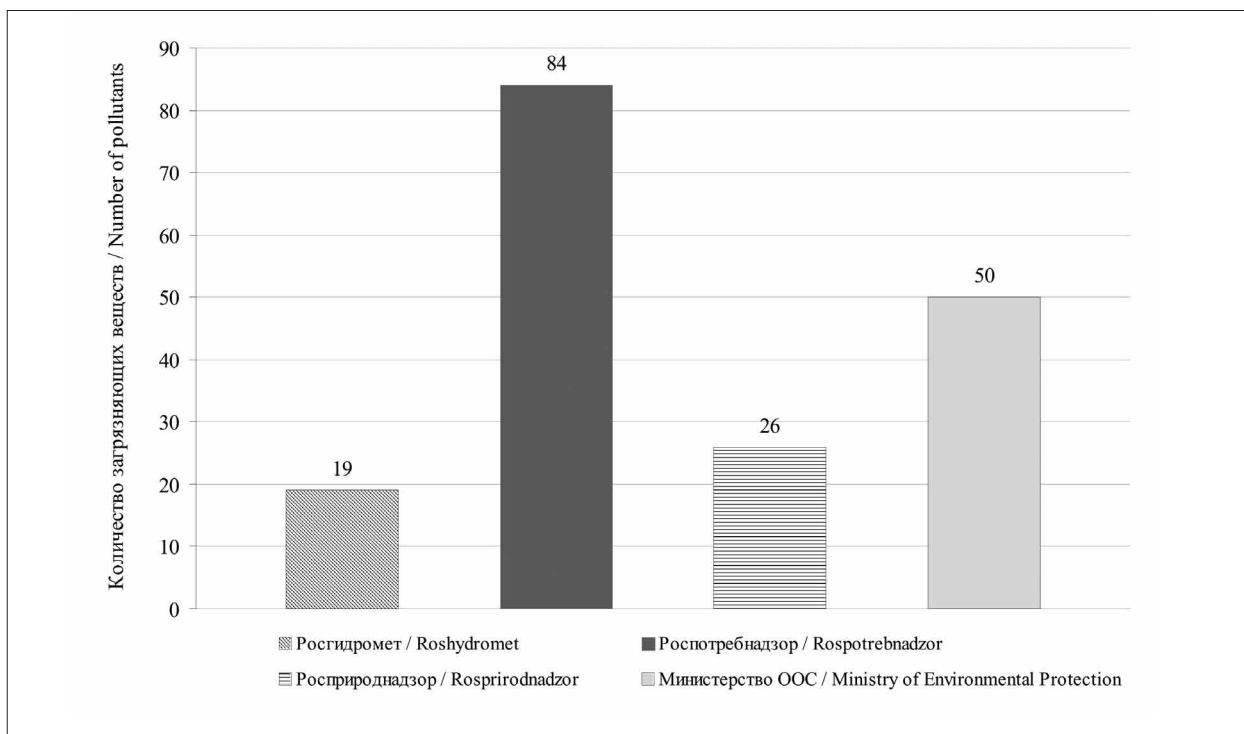


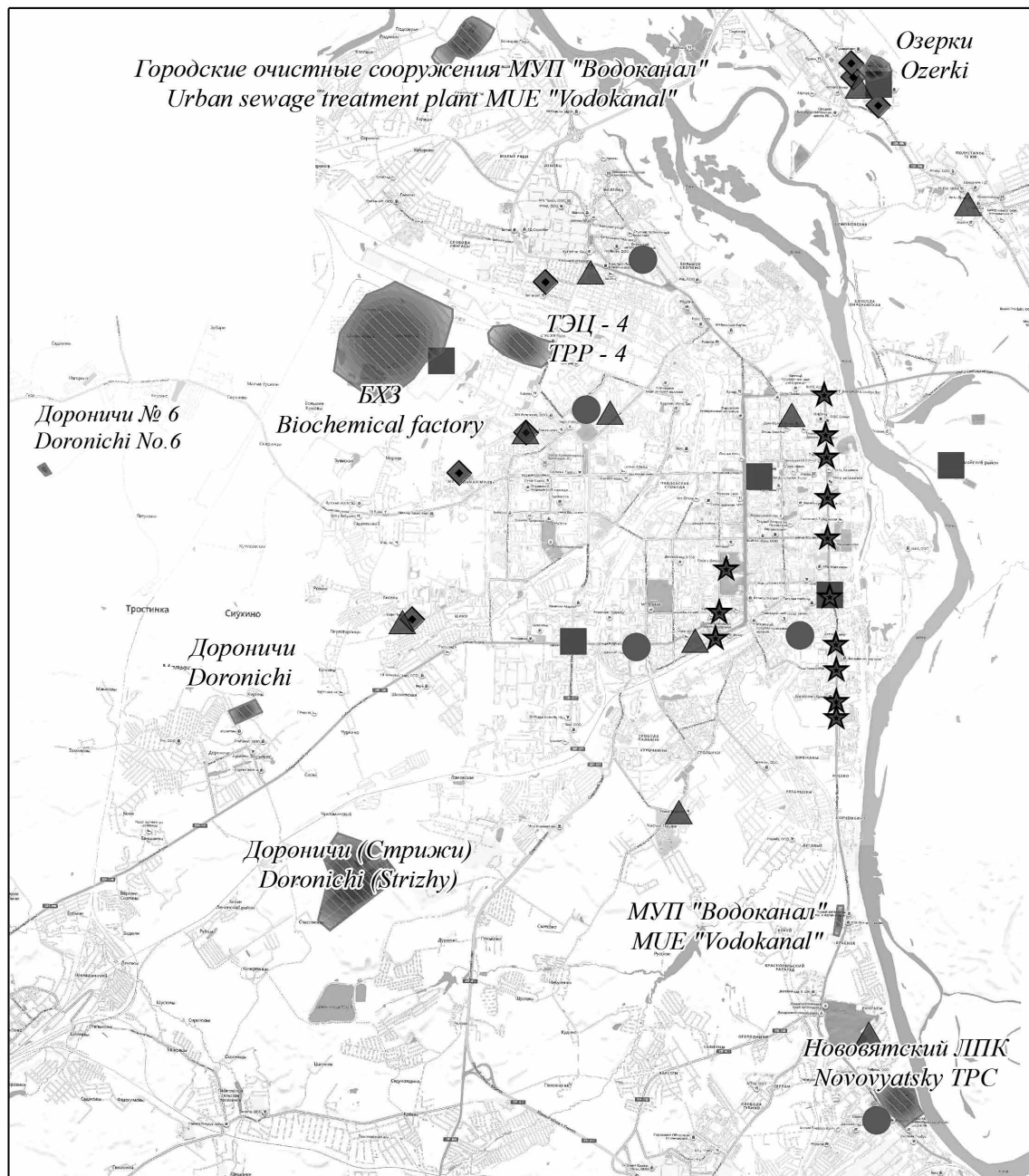
Рис. 1. Количество загрязняющих веществ, контролируемых природоохранными органами в г. Кирове и Кировской области / **Fig. 1.** Number of pollutants controlled by environmental authorities in Kirov and the Kirov Oblast

Установлено [17], что перечень показателей, по которым проводится контроль и мониторинг в г. Кирове, представляет данные по 103 веществам, из них соединений I класса опасности – 10 (9,7 % от общего количества отслеживаемых ЗВ), II класса – 32 (31,4 %), III класса – 40 (38,8 %), IV класса – 18 (17,5 %), у трёх соединений (2,9 %) не установлен класс опасности.

По линии природоохранных организаций: КОГБУ «Областной природоохранный центр» Министерства охраны окружающей среды Кировской области, Кировского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромета), ЦЛТИ при филиале Управления Росприроднадзора по Кировской области, ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Кировской области» и СИАК Управления Роспотребнадзора по Кировской области созданы и функционируют стационарные посты наблюдения, точки контроля вблизи источников загрязнения, участки постоянного мониторинга, а также созданы и действуют мобильные лаборатории (рис. 2).

Управлением Роспотребнадзора по Кировской области в рамках своих полномочий осуществляется постоянный социально-гигиенический мониторинг (СГМ) за состоя-

нием атмосферного воздуха на 15 промплощадках 5 хозяйствующих субъектов: МУП «Водоканал», ООО «ДИОН», ООО «КИБИХ», АО «Агрофирма «Дорони́чи», АО «Агрокомбинат племзавод «Красногорский» (рис. 2) [17]. Выявлено, что из общего перечня химических соединений, включающих 107 ЗВ, выбрасываемых в атмосферный воздух с данных промплощадок г. Кирова, 59 соединений жидкие или газообразные вещества, из них 45 ЗВ имеют характерный специфический запах, а 13 веществ обладают наиболее резким, неприятным, тошнотворным запахом (метанол, этанол, аммиак, фурфурол, уксусная кислота, диметилсульфид, формальдегид, этилформиат, сероводород, диэтиловый эфир, аминометан, этилмеркаптан, метилмеркаптан). При массовом поступлении обращений граждан на загрязнение атмосферного воздуха Управлением Роспотребнадзора организуется дополнительный мониторинг на территории жилой застройки г. Кирова. Кроме общепромышленных ЗВ (взвешенные вещества, диоксид серы, оксид углерода, диоксид азота), определяется содержание специфических ЗВ, в том числе обладающих резким неприятным запахом (диметилсульфид, формальдегид, фенол, аммиак, сероводород, метанол, метантиол, метиламин, фурфурол, этановая (уксусная) кислота,



Пункты отбора проб воздуха / Air sampling points by

- ▲ Роспотребнадзора
Rospotrebnadzor
- Кировского ЦГМС
Kirov SChEM
- ★ НИЛ биомониторинга ВятГУ
Vyatka State University Research
Laboratory of Biomonitoring
- Министерства охраны окружающей среды (ОС)
Ministry of Environmental Protection
- ◆ Министерства охраны ОС (моб. эколаборатория)
Ministry of Environmental Protection (mobile ecolaboratory)
- ▨ Источники запахового загрязнения
Sources of odor pollution

Рис. 2. Карта-схема сети контроля и мониторинга атмосферного воздуха на территории г. Кирова
Fig. 2. Map of the control and monitoring network in Kirov

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННО НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

этанол, этоксиэтан, этантиол, этилформиат и др.). По результатам СГМ и дополнительного мониторинга в 2024 г. превышений предельно-допустимых концентраций (ПДК) ЗВ в атмосферном воздухе не установлено.

По данным Кировского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала государственного бюджетного учреждения «Верхне-Волжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (Кировский ЦГМС – филиал ФГБУ «Верхне-Волжское УГМС») государственный экологический мониторинг проводится в 5 пунктах на территории г. Кирова. В течение 2024 г. случаев высокого загрязнения и экстремально высокого загрязнения атмосферного воздуха в пунктах

наблюдательной сети Кировского ЦГМС не зарегистрировано.

Общий уровень загрязнения атмосферного воздуха в Кировской области и областном центре г. Кирове остаётся низким по сравнению со средними показателями по РФ (табл. 1). Превышение ПДК по формальдегиду и пыли зафиксировано лишь в 0,02 % проб в 2023–2024 гг., тогда как по РФ – около 0,78 %. Основной вклад в загрязнение вносит автотранспорт (до 50 % выбросов), хотя доля выбросов от мобильных источников постепенно снижается из-за роста числа газомоторных и электрических автомобилей [18, 19].

Анализ данных таблицы 1 свидетельствуют о том, что за последние годы доля проб атмосферного воздуха, превышающих

Таблица 1 / Table 1

Количество исследованных проб атмосферного воздуха / Number of studied air samples

| Количество проб Number of samples | Год / Year | | | | | | | | | | |
|---|------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Всего, шт. Total, samples | 15880 | 10419 | 10419 | 9985 | 10462 | 11170 | 13811 | 14868 | 13833 | 12323 | 12325 |
| из них: превышающих ПДК, % / from the above: exceeding the MPC, % | | | | | | | | | | | |
| в Кировской области in Kirov Oblast | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,08 | 0,1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |
| В России in Russia | 1,02 | 0,81 | 0,83 | 0,7 | 0,7 | 0,66 | 0,59 | 0,83 | 0,79 | 0,78 | 0,78 |

Таблица 2 / Table 2

Количество валового выброса загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу Кировской области, тыс. т
Air gross emission of pollutants in Kirov Oblast, $\cdot 10^3$ t

| ЗВ Pollutants | Год / Year | | | | | | | | | | |
|--|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
| Всего / Total | 114908 | 96140 | 98636 | 98081 | 94281 | 82698 | 85142 | 88600 | 85738 | 88736 | 118820 |
| Оксид углерода (II) Carbon monoxide | 35207 | 34110 | 39931 | 41353 | 39802 | 29162 | 34780 | 34721 | 35086 | 34750 | 35249 |
| Углеводороды (без ЛОС) Hydrocarbons (without VOS) | 21528 | 15090 | 16584 | 16671 | 16048 | 18665 | 13856 | 18224 | 16786 | 20290 | 48281 |
| Твёрдые ВВ Solid SS | 22130 | 17870 | 16786 | 17011 | 16325 | 15737 | 17120 | 16377 | 15306 | 14333 | 13249 |
| Оксиды азота Nitrogen oxides | 13908 | 12100 | 11758 | 11487 | 11054 | 10788 | 11460 | 10967 | 10353 | 10862 | 11028 |
| SO ₂ | 14905 | 10840 | 7835 | 5297 | 5098 | 3830 | 4280 | 3227 | 3209 | 2966 | 3206 |
| ЛОС / VOS | 4920 | 3930 | 3295 | 3669 | 3495 | 2946 | 3195 | 3154 | 2772 | 3455 | 5543 |
| Прочие / Other | 2310 | 2200 | 2447 | 2593 | 2459 | 1967 | 2062 | 1929 | 2226 | 2080 | 2267 |

Примечание: ЛОС – летучие органические соединения, ВВ – взвешенные вещества.
Note: VOS – volatile organic substances, SS – suspended substances.

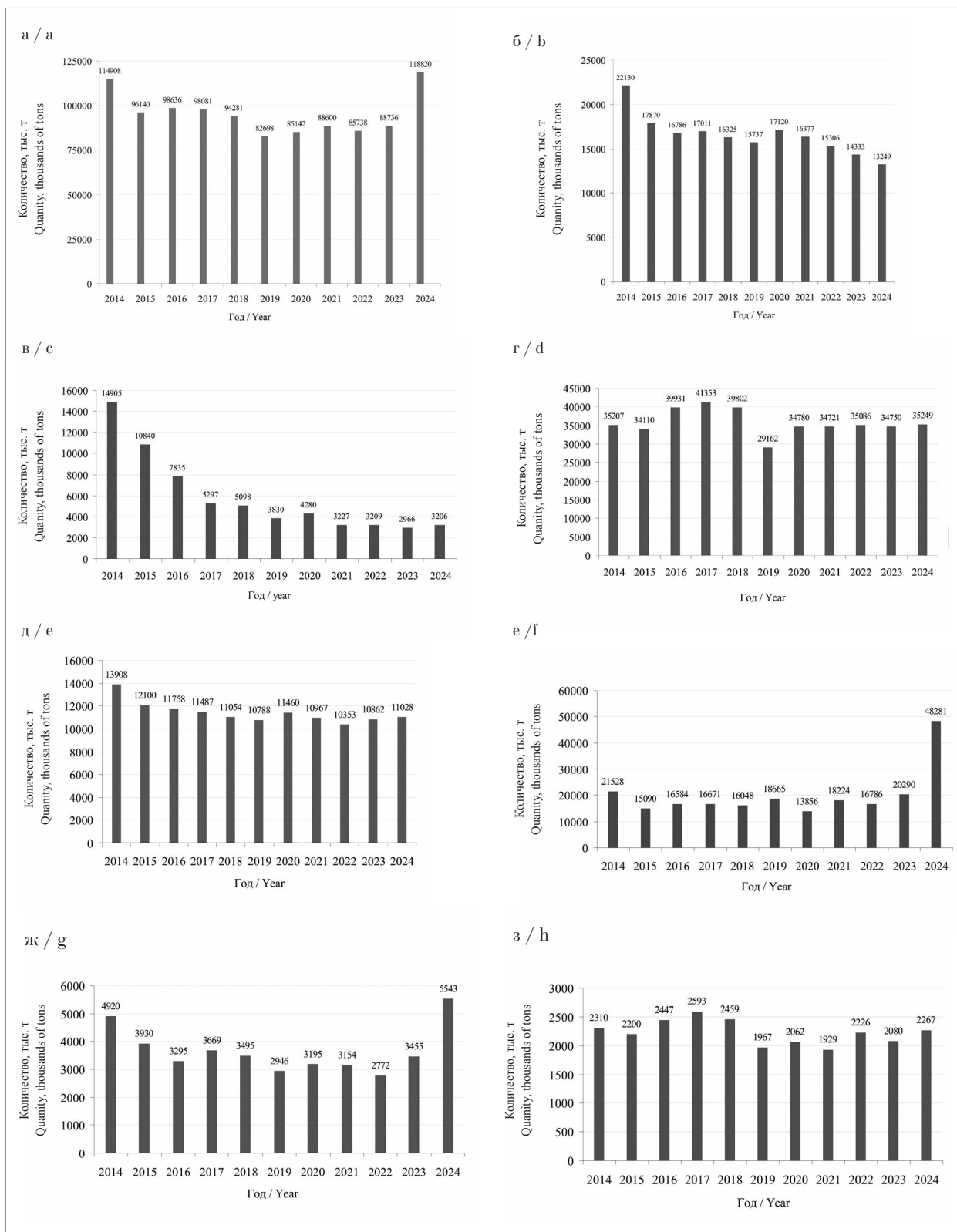


Рис. 3. Динамика валового выброса в атмосферу Кировской области, тыс. т:
 а) общее количество, б) твёрдых взвешенных веществ, в) диоксида серы, г) оксида углерода (II),
 д) оксидов азота, е) углеводородов (без ЛОС), ж) ЛОС, з) прочих веществ
Fig. 3. Dynamics of gross emissions into the atmosphere of the Kirov region, thousand tons:
 а – total quantity, б – solid suspended substances, в – sulfur dioxide,
 д – carbon monoxide, е – nitrogen oxides, ф – hydrocarbons (excluding volatile organic compounds),
 г – volatile organic compounds, h – other substances

значения ПДК, на территории региона проявляет устойчивую тенденцию к уменьшению (в 2022–2024 гг. составляла 0,02 %), в сравнении с 2014–2015 гг. данный показатель уменьшился в 10 раз, в то время как в целом по стране за период 2014–2024 гг. количество проб атмосферного воздуха, превышающих значения ПДК, остаётся стабильным на уровне 0,6–0,8 %.

По данным материалов ежегодных региональных докладов «О состоянии окружающей среды Кировской области» [18, 19] сделан сравнительный анализ по объёмам выбросов ЗВ в атмосферу в регионе от стационарных источников за период с 2014 по 2024 гг. (табл. 2).

Из данных таблицы 2 следует, что оксид углерода, твёрдые взвешенные вещества и углеводороды занимают преимущественное значение в объёмах выбросов в атмосферный воздух. Наряду с этим следует отметить, что по большинству ЗВ с 2014 по 2023 гг. (табл. 2, рис. 3а–з) наметилось существенное снижение количества выбросов в атмосферу, наибольшее уменьшение выбросов составило по диоксиду серы – почти в 3–5 раз (рис. 3в). Однако следует отметить, что в 2024 г. валовый выброс ЗВ от стационарных источников в атмосферу Кировской области составил 118820 т, в то время как в 2021–2023 гг. его объём составлял чуть более 88 тыс. т. Как следует из таблицы 2, увеличение валового выброса ЗВ в 2024 г. на 30,08 тыс. т осуществилось, в основном, за счёт углеводородов, объём которых более чем в 2 раза превысил количество ЗВ в атмосферном воздухе в 2023 г. Вероятно, это может быть связано с тем, что на территории региона, в областном центре в п. Костино проводилась рекультивация крупнейшего полигона твёрдых бытовых отходов (ТБО). При проведении рекультивационных работ происходило перемещение большого количества отходов из одного места в другое, в результате чего в атмосферный воздух выбрасывалось большое количество ЗВ, в том числе углеводородов. В конце 2024 г. рекультивация полигона ТБО завершена, отходы изолированы, есть уверенность в том, что тенденция снижения объёмов выбросов ЗВ в атмосферный воздух по г. Кирову будет в дальнейшем сохраняться.

Наибольшая доля в выбросах в атмосферный воздух от стационарных источников на территории г. Кирова приходится на 37 ЗВ (табл. 3). Причём в выбросах от стационарных источников максимальный объём приходится

на метан, сажу (углерод) и аммиак, метилбензол, диметилбензол, бензин, метанол, формальдегид, ацетон, этилбензол, бутилацетат, уксусную и азотную кислоты, сероводород. Наиболее резким неприятным запахом из перечисленных 37 ЗВ (табл. 3) обладают: аммиак, сероводород, фурфурол, формальдегид, уксусная кислота, ацетон, метиловый спирт, хлор, тетрахлорметан.

Достаточно серьёзной проблемой состояния атмосферного воздуха в крупных городах региона являются выбросы от автотранспорта. В Кировской области выбросы автомобильного транспорта составляют от 45 до 50 % от общего объёма выбросов. Динамика роста количества транспортных средств в Кировской области, а также динамика валового выброса от мобильных источников, по данным региональных докладов «О состоянии окружающей среды Кировской области» за 2014–2024 гг., представлены на рисунках 4, 5. Анализ этих данных свидетельствует о том, что количество транспортных средств в регионе с каждым годом растёт, но общий объём выбросов ЗВ от них в атмосферу снижается. Это связано с переходом транспортных средств на использование газообразного топлива, а также с ростом количества электромобилей в регионе по данным региональных докладов.

Сравнение данных по выбросам от стационарных и передвижных источников (табл. 3, 4) свидетельствует о том, что в выбросах от стационарных источников максимальный объём приходится на метан, сажу (углерод), аммиак, метилбензол, диметилбензол, в то время как от передвижных источников максимальный выброс приходится на оксид углерода, оксиды азота и неметановые летучие соединения. По данным государственного доклада РФ за 2023 г., в Кировской области в числе субъектов РФ, в которых содержание отдельных ЗВ в атмосферном воздухе городских поселений в 2023 г. превысило 5 ПДК, отмечен лишь этилацетат [19].

В общем объёме выбросов ЗВ в атмосферу по 2023 г. выбросы от автотранспорта составляли 48,6 %. Несмотря на рост автомобильного транспорта, общий объём выбросов ЗВ в атмосферный воздух снижается. Во многом это обусловлено использованием двигателей высоких классов Евро-4 и Евро-5 и переходом автотранспорта на газообразное топливо.

Таким образом, анализ данных о состоянии атмосферного воздуха на территории региона свидетельствует о том, что за исследуемый период (2014–2024 гг.) наблюдается

Таблица 3 / Table 3

Количество выбросов ЗВ от стационарных источников в атмосферный воздух г. Кирова в 2023 г.
The emissions of air hazardous substances from stationary sources in Kirov in 2023

| Вещество Substance | Количество выбросов, т (класс опасности) Amount of emissions, t (hazard class) | Вещество Substance | Количество выбросов, т (класс опасности) Amount of emissions, t (hazard class) |
|---|---|--|---|
| Метан / Methane | 20287 (IV) | Масло минеральное нефтяное Mineral petroleum oil | 11 (III) |
| Сажа / Soot (C) | 4560 (III) | Бензол / Benzene | 11 (II) |
| Аммиак / Ammonia | 1759 (IV) | Хлороводород / Hydrogen chloride | 10 (III) |
| Метилбензол Methylbenzene | 258 (III) | Гидроксibenзол (фенол) / Hydroxybenzene (phenol) | 9 (II) |
| Диметилбензол Dimethylbenzene | 217 (III) | Белково-витаминный концентрат (по белку) / Protein-vitamin concentrate (protein) | 8 (II) |
| Бензин нефтяной малосернистый Low-sulfur petroleum gasoline | 92 (III) | Гексан / Hexane | 6 (III) |
| Метанол (метилловый спирт) Methanol (methyl alcohol) | 67 (III) | Марганец, диоксид марганца Manganese, manganese dioxide | 6 (II) |
| Пропанон-2 (ацетон) Propanone-2 (acetone) | 58 (III) | Фуран-2-альдегид (фурфурол) Furan-2-aldehyde (furfural) | 5 (II) |
| Формальдегид Formaldehyde | 42 (II) | Мазутная зола / Fuel oil ash | 4 (III) |
| Пропанол-2 (пропиловый спирт) Propanol-2 (propyl alcohol) | 38 (III) | Фтороводород / Hydrogen fluoride | 3 (II) |
| Этилбензол Ethylbenzene | 28 (III) | Пропанол-1 / Propanol-1 | 3 (III) |
| Бутилацетат Butyl acetate | 28 (III) | Серная кислота / Sulfuric acid | 3 (II) |
| Уксусная кислота Acetic acid | 26 (III) | Бутан / Butane | 3 (II) |
| Азотная кислота Nitric acid | 22 (III) | Этиленбензол / Ethenylbenzene | 3 (II) |
| Сероводород Hydrogen sulfide | 20 (II) | Полиэтен / Polyethylene | 2 (IV) |
| Пыль неорганическая Inorganic dust | 16+1073 (III) | Хлор / Chlorine | 2 (II) |
| Тетрахлорметан Carbon tetrachloride | 13 (II) | Диметиламин / Dimethylamine | 1 (II) |
| Этилацетат Ethyl acetate | 11 (III) | Этоксизтан / Ethoxyethane | 1 (III) |
| Пыль комбикормовая Feed dust | 11 (IV) | Прочие / Others | 10,981 |

Примечание: жирным шрифтом выделены соединения с наиболее резким запахом.
Note: Compounds with the most pungent odor are shown in bold.

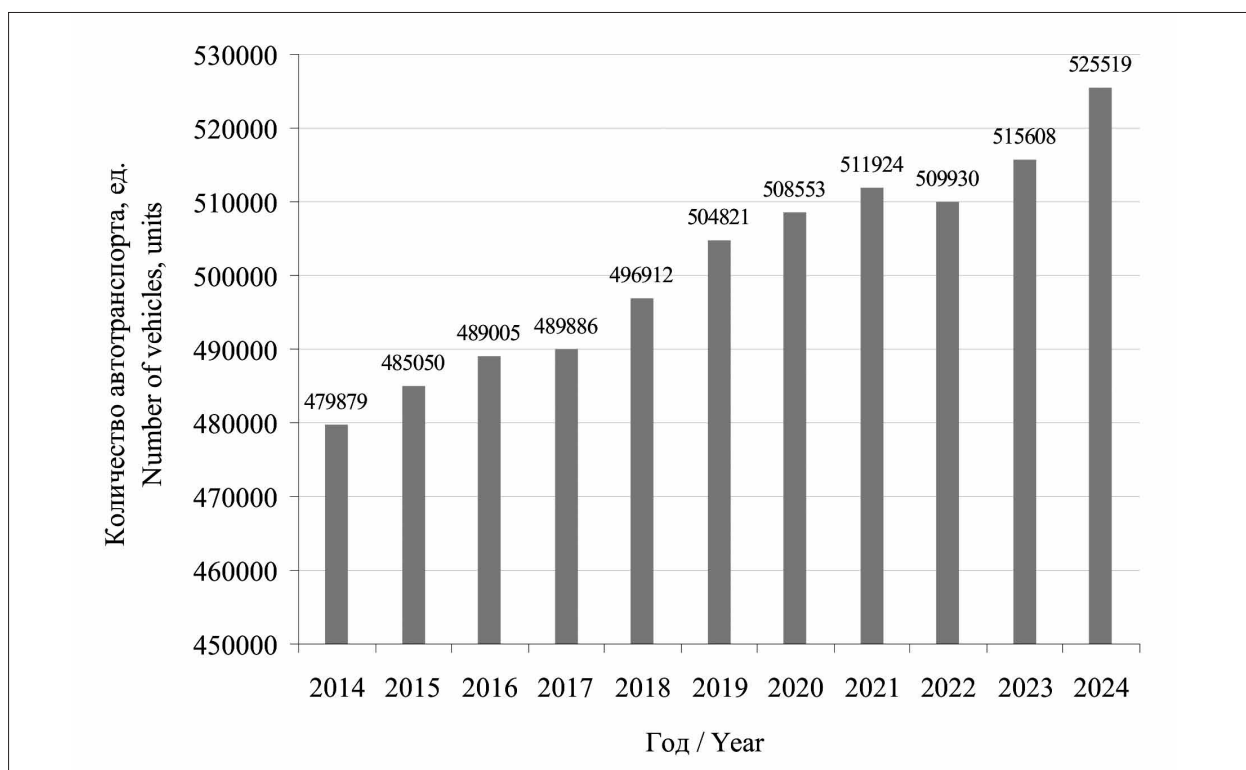


Рис. 4. Динамика роста количества автотранспорта в Кировской области, ед.
 Fig. 4. Dynamics of growth in the number of motor vehicles in the Kirov Oblast, units

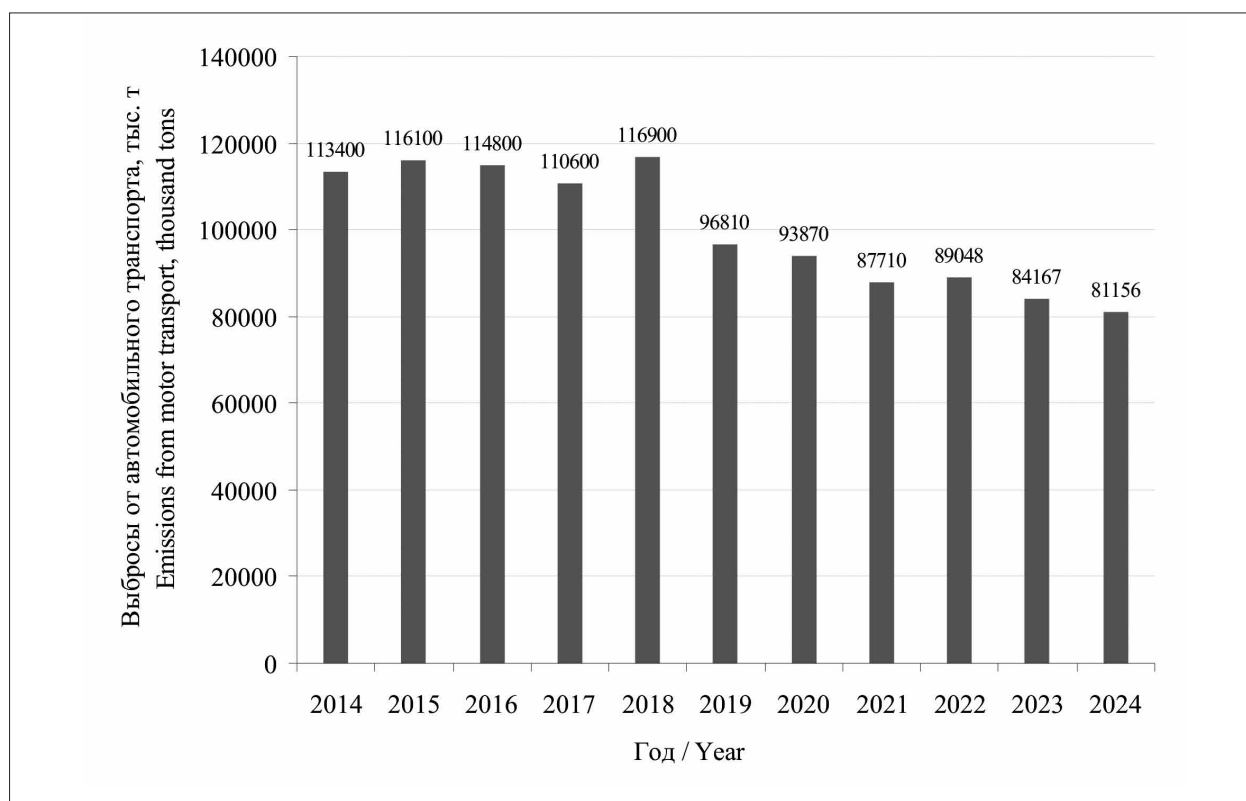


Рис. 5. Динамика выбросов от автомобильного транспорта в Кировской области, тыс. т
 Fig. 5. Dynamics of emissions from motor transport in the Kirov Oblast, thousand tons

Таблица 4 / Table 4

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от передвижных источников в 2023 г.
Emissions of pollutants into the atmosphere from mobile sources in 2023

| Загрязняющие вещества / Pollutants | Количество выбросов, т Amount of emissions, t |
|---|--|
| Оксид углерода(II) / Carbon(II) monoxide | 60,690004 |
| Оксиды азота (NO _x) в пересчёте на NO ₂ Nitrogen oxides (NO _x) converted to NO ₂ | 13,720929 |
| Неметановые летучие соединения / Non-methane volatile compounds | 8,644902 |
| Твёрдые частицы в пересчёте на углерод (сажа) Carbon black particulate matter (soot) | 0,390168 |
| Аммиак / Ammonia NH ₃ | 0,298895 |
| Диоксид серы / Sulfur dioxide SO ₂ | 0,288787 |
| Метан / Methane CH ₄ | 0,134231 |
| Всего по Кировской области / Total for the Kirov Oblast | 84,167915 |
| Всего по Приволжскому федеральному округу Total for the Volga Federal District | 429,745 |

относительное снижение объёма валового выброса ЗВ от стационарных и передвижных источников. Основными составляющими измеряемых выбросов являются монооксид углерода, взвешенные вещества и углеводороды. При этом содержание монооксида углерода и диоксида азота в выбросах в атмосферный воздух постоянно из года в год находится почти на одинаковом уровне (рис. 3г, д), тогда как диоксида серы существенно снижается (рис. 3в). Намечилась устойчивая тенденция снижения объёма валового выброса ЗВ от транспортных средств.

Обоснование методов и подходов по организации системы экологического мониторинга атмосферного воздуха. Система контроля и экологического мониторинга атмосферного воздуха в г. Кирове и Кировской области является относительно развитой, но в то же время сталкивается с рядом трудностей, которые можно обобщить следующим образом. Во-первых, традиционно как контроль, так и экологический мониторинг осуществляются в течение ряда лет в большинстве случаев по отслеживанию общепромышленных ЗВ (взвешенные вещества, оксиды углерода, азота, серы, частично низшие углеводороды), в то время как за последние годы существенно изменяется спектр ЗВ.

Особенно это касается г. Кирова – административного центра Кировской области, важного промышленного и культурного центра региона. Городская инфраструктура включает крупные промышленные предприятия (машиностроительные предприятия, химические заводы, электростанции), сельскохозяйственное производство, а также строительные предприятия, которые влияют на загрязнение воздуха, воды и почвы. За по-

следние годы городская инфраструктура приобретает существенное развитие, увеличивают свои мощности промышленные предприятия, в том числе предприятия химического профиля по производству шин, искусственных кож, полимерных материалов, масел и красок, получают развитие новые предприятия среднего и малого бизнеса, особенно в области новых биотехнологий.

Активизировалось масштабное переселение сельского населения в город, в связи с чем уплотняется жилая городская застройка. Целые жилые комплексы создаются вблизи промышленных и сельскохозяйственных предприятий, не всегда соблюдаются при этом нормы и правила относительно содержания территорий СЗЗ предприятий. Зачастую не справляется с нагрузкой жилищно-коммунальная система, которая во многих городах, в том числе и в г. Кирове, требует существенного обновления.

С каждым годом возрастает в городе количество транспортных средств, возникает существенная загруженность транспортных магистралей, особенно в центре города и на перекрёстках, медленно обновляется городской парк транспортных средств. Всё это, в первую очередь, сказывается на состоянии атмосферного воздуха городской среды.

За последние годы во многих городах, так же как и в г. Кирове, возникли проблемы запахового загрязнения атмосферного воздуха. В связи с этим в природоохранные службы, органы власти поступает значительное количество писем и просьб от населения по данной проблеме, особенно в весенне-летне-осенний период. В то же время проводимый природоохранными службами экологический мони-

торинг в городе не выявляет повышенные концентрации общепромышленных ЗВ, а содержание специфических запахообразующих ЗВ на постоянной основе не контролируется. Проблема контроля запахообразующих ЗВ заключается в следующем – многие из них в выбросах в атмосферный воздух содержатся в малых количествах, в соответствии с этим, определение их затруднено из-за чувствительности методов или прибора, на котором ЗВ определяется. Кроме того, запахообразующие вещества находятся в атмосферном воздухе в виде различных смесей и примесей, трудно разделяемых и различаемых при определении их на большинстве приборов [17, 20–22].

В связи с этим создание системы мониторинга атмосферного воздуха в г. Кирове и в регионе в целом требует нового подхода, включающего выявление наиболее информативных показателей контроля и экологического мониторинга с учётом специфики развивающихся предприятий. Безусловно, важным аспектом развития системы экологического мониторинга является расширение сети постов, наблюдательных станций, участков и точек контроля и мониторинга в наиболее приоритетных местах, на крупных магистралях. Обновление системы экологического мониторинга нуждается в развитии мобильного мониторинга, т. е. увеличении количества мобильных лабораторий, оснащённых современными приборами для оценки состояния атмосферных газов непосредственно в местах отбора проб, а также внедрение методов дистанционного мониторинга с использованием беспилотных летательных аппаратов, с целью измерения выбросов не только вблизи предприятия, но и по направлению распространения загрязнённого атмосферного воздуха. Для визуализации загрязнения и прогнозирования экологической ситуации необходимо активнее внедрять ГИС-технологии.

Наряду с этим обновление системы мониторинга атмосферного воздуха требует от химиков-аналитиков разработки новых лабораторных и полевых методов колориметрического, спектрального и хроматографического анализа для более точных измерений специфических ЗВ, в том числе и запахообразующих: ксилола, стирола, крезола, скатола, летучих органических кислот (масляной, пропионовой, валерьяновой, изомасляной), эфиров, бенз(а)пирена, сероводорода, меркаптанов, винилхлорида, хлороформа, формальдегида и различных нефтепродуктов.

При всём этом, самым важным в развитии системы экологического контроля и мониторинга городской среды является укрепление сотрудничества между ведомствами и предприятиями, интеграция данных природоохранных служб (Росгидромета, Роспотребнадзора, Росприроднадзора, Министерства охраны окружающей среды) и промышленных предприятий в единую систему. Создание единой цифровой платформы для сбора и анализа данных, более точного прогноза развития природных (паводки, наводнения, ветряные бури) и экологических ситуаций.

К разработке и развитию системы экологического мониторинга атмосферного воздуха целесообразно привлекать научно-исследовательские учреждения, вузы, аккредитованные экологические лаборатории, на базе которых может проводиться создание новых экспресс-методов определения специфических ЗВ, мобильных приложений, программ, разработки бытовых датчиков воздуха для экологического мониторинга. При этом, существенно может быть повышена роль общественного мониторинга со стороны граждан за счёт использования бытовых датчиков воздуха, применения мобильных приложений для регистрации жалоб на загрязнения, выявления наиболее загрязнённых мест, участков атмосферного воздуха городской среды.

Заключение

Создание системы мониторинга атмосферного воздуха в Кировской области требует комплексного подхода, который можно резюмировать в следующих направлениях:

- расширение сети стационарных станций мониторинга, что, в свою очередь, требует оснащения промышленных городов региона (Киров, Кирово-Чепецк, Слободской, Вятские Поляны) новыми станциями мониторинга и установки станций мониторинга на крупных магистралях;
- развитие мобильного мониторинга и увеличение количества мобильных лабораторий с оснащением современными приборами для анализа газов;
- использование методов дистанционного мониторинга, ГИС-технологий для визуализации загрязнения и прогнозирования экологической ситуации;
- включение в перечень показателей контроля и экологического мониторинга атмосферного воздуха новых опасных ЗВ, в том числе запахообразующих соединений:

ксилола, стирола, крезоло, скатола, летучих органических кислот (масляной, пропионо-вой, валерьяновой, изомасляной), эфиров, бенз(а)пирена, сероводорода, меркаптанов, винилхлорида, хлороформа, формальдегида;

- разработка методов лабораторного, колориметрического и спектрального анализа для более точных измерений специфических ЗВ;
- укрепление сотрудничества между ведомствами и предприятиями, интеграция данных Росгидромета, Роспотребнадзора, Росприроднадзора, Министерства охраны окружающей среды в единую систему, создание единой цифровой платформы для сбора и анализа данных (аналогично системе экологического мониторинга в других городах);
- повышение роли общественного мониторинга со стороны граждан за счёт распространения бытовых датчиков воздуха, разработки мобильных приложений для мониторинга и регистрации жалоб на загрязнение, а также сотрудничества с экологическими активистами и университетами, проводящими независимые экологические исследования.

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.

Литература

1. Павлов Н.И., Кулеш М.М. Глобальные системы мониторинга окружающей среды и фоновый мониторинг // Вестник ДВГАЭУ. 2000. № 4 (16). С. 66–75.
2. Снытко В.А., Собисевич А.В. Система экологического мониторинга в научном наследии академиков И.П. Герасимова и Ю.А. Израэля // Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование: труды пятой международной конференции. Москва: ООО «Буки-Веди», 2017. С. 393–397.
3. Израэль Ю.А., Филиппова Л.М., Инсаров Г.Э. Теоретические и прикладные аспекты фонового экологического мониторинга состояния биоты // Проблемы экологического мониторинга и моделирование экосистем. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. Т. 3. С. 7–24.
4. Сорока Н.Н. Региональный экологический мониторинг как специфический источник информации о состоянии окружающей среды в субъекте Российской Федерации // Вестник СИБИТа. 2015. № 1 (13). С. 47–51.
5. Ашихмина Т.Я., Сюткин В.М. Комплексный экологический мониторинг региона (на примере Кировской области). Киров: ВГПУ, 1997. 286 с.

6. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 168 с.
7. Мониторинг природных сред и объектов / Под ред. Т.Я. Ашихминой. Киров: Старая Вятка, 2006. 251 с.
8. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование / под ред. О.П. Мелеховой, Е.И. Егоровой. М.: Академия, 2007. 287 с.
9. Трифонова Т.А., Мищенко Н.В., Краснощёков А.Н. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование в экологических исследованиях. М.: Академический Проект, 2020. 349 с.
10. Дроздов С.Л., Сладкопепцев С.А. Дистанционные методы оценки природных ресурсов (рельеф и почвы). М.: МИИГАиК, 2015. 178 с.
11. 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 В.В., 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
12. Абашев Т.Э., Ашихмина Т.Я., Хето М.Х. Сравнительная экологическая оценка техногенного воздействия на воздушный бассейн территории Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 2. С. 35–47. doi:10.25750/1995-4301-2024-2-035-047
13. Giannakis E., Kushta J., Giannadaki D., Georgiou G.K., Bruggeman A., Lelieveld J. Exploring the economy-wide effects of agriculture on air quality and health: Evidence from Europe // Sci. Total Environ. 2019. V. 663. P. 889–900. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.410
14. Khaniabadi Y.O., Daryanoosh S.M., Amrane A., Polosa R., Hopke P.K., Goudarzi G., Mohammadi M.J., Sicard P., Armin H. Impact of middle eastern dust storms on human health // Atmos. Pollut. Res. 2017. V. 8. P. 606–613. doi: 10.1016/j.apr.2016.11.005
15. Estimating the external costs of industrial air pollution: Trends 2012–2021: Technical note on the methodology and additional results from the EEA briefing 24/2023 [Электронный ресурс] https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/the-costs-to-health-and-the-environment-from-industrial-air-pollution-in-europe-2024-update/technical-note_estimating-the-external-costs-of-industrial-air-pollution-trends-2012-2021v2.pdf (Дата обращения: 16.08.2025).
16. Мельников П.А., Гусев Д.М., Селезнева К.В., Шашенко В.А. Особенности мониторинга атмосферного воздуха крупных городов с развитой промышленностью // Экология и промышленность России. 2024. Т. 28. № 2. С. 32–37. doi: 10.18412/1816-0395-2024-2-32-37
17. Ашихмина Т.Я., Мальцева Л.Г., Хайданова Е.В., Сырчина Н.В., Хето М.Х. Оценка загрязнения приземного слоя атмосферы городской среды // Теоретиче-

ская и прикладная экология. 2025. № 2. С. 72–85. doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-072-085

18. О состоянии окружающей среды Кировской области в 2024 году: региональный доклад / Под общ. ред. Т.Э. Абашева. Киров, 2025. 195 с.

19. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году: государственный доклад. М.: Минприроды России; ООО «Интеллектуальная аналитика»; ФГБУ «Дирекция НТП»; Фонд экологического мониторинга и международного технологического сотрудничества, 2024. 707 с.

20. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Контроль запахового загрязнения атмосферного воздуха (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 2. С. 26–34. doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034

21. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году: государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2023. 368 с.

22. Сырчина Н.В., Пилип Л.В., Ашихмина Т.Я. Основные подходы к снижению запахового загрязнения окружающей среды предприятиями животноводства (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 6–19. doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-006-019

References

1. Pavlov N.I., Kulesh M.M. Global environmental monitoring systems and background monitoring // Vestnik DVGAEU. 2000. No. 4 (16). P. 66–75 (in Russian).

2. Snytko V.A., Sobisevich A.V. The system of environmental monitoring in the scientific heritage of I.P. Gerasimov and Yu.A. Izrael academicians // Environmental status indication: theory, practice, and education: trudy pyatoy mezhdunarodnoy konferentsii. Moskva: OOO “Buki-Vedi”, 2017. P. 393–397 (in Russian).

3. Izrael Yu.A., Filippova L.M., Insarov G.E. Theoretical and applied aspects of background ecological monitoring of the biota status // Problems of ecological monitoring and ecosystem modeling. V. 3. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. P. 7–24 (in Russian).

4. Soroka N.N. Regional environmental monitoring as a specific source of information about the state of the environment in the Russian Federation // Vestnik Sibirskogo instituta biznesa i informatsionnykh tekhnologii. 2015. No. 1 (13). P. 47–51 (in Russian).

5. Ashikhmina T.Ya., Syutkin V.M. Comprehensive regional environmental monitoring (case-study of the Kirov Region). Kirov: VGPU, 1997. 286 p. (in Russian).

6. Motuzova G.V. Trace element compounds in soils: system organization, ecological significance, and monitoring. Moskva: Knizhnyy dom “LIBROKOM”, 2009. 168 p. (in Russian).

7. Natural environments and objects monitoring / Ed. T.Ya. Ashikhmina. Kirov: Staraya Vyatka, 2006. 251 p. (in Russian).

8. Biological environmental control: bioindication and biotesting / Eds. O.P. Melekhova, E.I. Egorova. Moskva: Academy, 2007. 287 p. (in Russian).

9. Trifonova T.A., Mishchenko N.V., Krasnoshchekov A.N. Geoinformation systems and remote sensing in environmental research. Moskva: Akademicheskii Project, 2020. 349 p. (in Russian).

10. Drozdov S.L., Sladkoptev S.A. Remote methods of natural resources assessment (relief and soils). Moskva: MII GAIK, 2015. 178 p. (in Russian).

11. 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

12. Abashev T.E., Ashikhmina T.Ya., Kheto M.H. Ecological assessment of technogenic impact on the air basin of the Kirov region // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 2. P. 35–47 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-035-047

13. Giannakis E., Kushta J., Giannadaki D., Georgiou G.K., Bruggeman A., Lelieveld J. Exploring the economy-wide effects of agriculture on air quality and health: Evidence from Europe // Sci. Total Environ. 2019. V. 663. P. 889–900. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.410

14. Khaniabadi Y.O., Daryanoosh S.M., Amrane A., Polosa R., Hopke P.K., Goudarzi G., Mohammadi M.J., Sicard P., Armin H. Impact of middle eastern dust storms on human health // Atmos. Pollut. Res. 2017. V. 8. P. 606–613. doi: 10.1016/j.apr.2016.11.005

15. Estimating the external costs of industrial air pollution: Trends 2012–2021: Technical note on the methodology and additional results from the EEA briefing 24/2023 [Internet resource] https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/the-costs-to-health-and-the-environment-from-industrial-air-pollution-in-europe-2024-update/technical-note_estimating-the-external-costs-of-industrial-air-pollution-trends-2012-2021v2.pdf (Accessed: 16.08.2025).

16. Melnikov P., Gusev D., Selezneva K., Shashenko V. Features of atmospheric air monitoring in large cities with developed industry // Ecology and Industry of Russia. 2024. V. 28. No. 2. P. 32–37 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2024-2-32-37

17. Ashikhmina T.Ya., Maltseva L.G., Khaidanova E.V., Syrchina N.V., Kheto M.H. Assessment of pollution of the urban surface layer of the atmosphere // Theoretical and Applied Ecology. 2025. No. 2. P. 72–85 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-072-085

18. On the state of the environment in the Kirov Region in 2024: regional report / Ed. T.E. Abashev. Kirov, 2025. 195 p. (in Russian).

19. On the state of the environment and environmental protection in the Russian Federation in 2023: state report.

Moskva: Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation; LLC "Intellectual Analytics"; FGBU "Directorate of Scientific and Technical Programs"; Foundation for Environmental Monitoring and International Technological Cooperation, 2024. 707 p. (in Russian).

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

21. On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2022: state report. Moskva: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare, 2023. 368 p. (in Russian).

22. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 3. P. 6–19 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-006-019

**Состояние лишайниково-сосновой эпифитной микробиоты
в районе бывшего объекта уничтожения химического оружия**

© 2026. Л. И. Домрачева^{1,2}, д. б. н., профессор,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., зав. лабораторией, г. н. с.,
Е. А. Домнина^{1,2}, к. б. н., доцент, н. с.,
А. И. Коротких¹, ст. преподаватель,
Л. В. Трефилова¹, к. б. н., доцент, А. Л. Ковина¹, к. б. н., доцент,
А. С. Тимонов^{2,3}, вед. инженер,

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: anastasi0103@yandex.ru, ecolab2@gmail.com

В статье представлена характеристика эпифитных микробных комплексов лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl (Parmeliaceae) и коры сосны *Pinus sylvestris* L., на которой произрастает лишайник, собранных на участках, расположенных на разном удалении от бывшего объекта хранения и уничтожения химического оружия (ХО) «Марадыковский». Установлено, что численность эпифитной микробиоты *H. physodes* и субстрата её произрастания различается как между разными участками отбора, так и между талломами лишайника и корой. Между численностью эпифитной микробиоты лишайника и коры сосны существует высокая положительная корреляционная связь ($r = 0,98-0,92$). При всех существенных количественных отличиях эпифитных сообществ лишайника и коры сосны основным структурным элементом их стабильно выступают бактерии-аммонификаторы. Отмечена зависимость, согласно которой таллом лишайника *H. physodes*, обладающая высокой метаболической активностью, заселён различными группами эпифитных микроорганизмов. Проведённый химический анализ, направленный на определение содержания основных химических элементов в талломах лишайника, также выявил неоднородность их содержания в талломах на исследуемых участках. Известно, что любые экологически обусловленные изменения биохимического состава субстрата (слоевищ лишайника и коры сосны) отражаются на численности и структуре микробного комплекса. Выявлена максимальная заселённость таллома эпифитной микробиотой в варианте с лишайником *H. physodes* на сосне с участка, расположенного недалеко от бывшего объекта уничтожения ХО, при минимальном содержании в нём тяжёлых металлов (ТМ) и высоком уровне макро- и микроэлементов. На участке, расположенном вблизи от бывшего объекта хранения ХО и железнодорожной магистрали федерального значения, выявлена минимальная численность микроорганизмов и более высокое содержание ТМ. Подобное изменение численности и структуры микробного комплекса свидетельствует о влиянии техногенной нагрузки различного характера на развитие микробиоты, что может использоваться при проведении экологического мониторинга как диагностический признак трансформации среды.

Ключевые слова: *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., кора *Pinus sylvestris* L., эпифитные микроорганизмы, холобионты.

**The state of the lichen-pine epiphytic microbiota
in the area of a former chemical weapons destruction facility**

© 2026. L. I. Domracheva^{1,2} ORCID: 0000-0002-7104-3337, T. Ya. Ashikhmina^{2,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047,
E. A. Domnina^{1,2} ORCID: 0000-0002-5063-8606, A. I. Korotkikh¹ ORCID: 0000-0002-0700-371X,
L. V. Trefilova¹ ORCID: 0000-0002-9932-5803, A. L. Kovina¹ ORCID: 0000-0003-0503-3402,
A. S. Timonov^{2,3} ORCID: 0000-0001-8560-3051

¹Vyatka State Agrotechnological University,
133, Oktyabrskiy Prospekt, 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,

The article presents the characteristics of epiphytic microbial complexes of the *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl (Parmeliaceae) lichen and on the *Pinus sylvestris* L. bark, on which the lichen grows. The samples were collected in the sites located at different distances from the former chemical weapons (CW) storage and destruction facility "Maradykovsky". It was established that the abundance of the epiphytic microbiota of *H. physodes* and the substrate of its growth varies both between different sampling sites and between lichen thalli and bark. There is a high positive correlation between the abundance of epiphytic microbiota of the lichen and pine bark ($r = 0.98-0.92$). Despite all the significant quantitative differences between the epiphytic communities of lichen and pine bark, ammonifying bacteria consistently act as their main structural element. A relationship was noted whereby the thallus of the lichen *H. physodes*, possessing high metabolic activity, is populated by various groups of epiphytic microorganisms. A chemical analysis aimed at determining the content of essential chemical elements in the lichen thalli also revealed heterogeneity in their accumulation in the thalli across the study sites. It is known that any environmentally induced changes in the biochemical composition of the substrate (lichen thalli and pine bark) affect the abundance and structure of the microbial community. A probable association ($p = 0.008$) was established between the maximum thallus colonization by epiphytic microbiota in *H. physodes* lichen variant on a pine tree from a site located near a former chemical weapons destruction facility, which had minimal heavy metal (HM) content and high levels of macro- and microelements, and the microbiome of this lichen from a site located near a former chemical weapons storage facility and a federal railway line, where minimal microbial populations and higher HM content were detected. Such a change in the abundance and structure of the microbial complex indicates the influence of various technogenic loads on the development of the microbiota, which can be used in environmental monitoring as a diagnostic indicator of environmental transformation.

Keywords: *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., *Pinus sylvestris* L. bark, epiphytic microorganisms, holobionts.

Расширение экологических ниш организмов неизменно сопровождается возрастанием видового разнообразия и формированием новых консортивных связей. Высшие растения, а именно их надземные и подземные части, выступают в качестве благоприятной экониши для некоторых групп микроорганизмов и низших растений, в том числе лишайников [1]. Обитателей надземной части растений, связанных с хозяином отношениями типа комменсализма, называют эпифитами [2]. В настоящее время всё большее внимание исследователей привлекает концепция хологена, согласно которой растения и животные утрачивают статус автономных организмов [3, 4]. Вместо этого они рассматриваются в качестве биологических систем, объединяющих генофонд хозяина и геномы симбиотических микроорганизмов. В рамках хологеномной теории холобионтом называют интегративную структуру, в которой хозяин и вся связанная с ним микробиота функционируют как единое целое [5, 6]. В системе «хозяин – микробиом», согласно этой концепции, именно холобионты и их хологеномы следует считать единицей организации живых систем. Для всех многоклеточных организмов характерно присутствие разнообразной микробиоты, причём нередко количество микробных клеток и суммарный генетический материал микросимбионтов значительно превышают таковые у хозяина. Как геном хозяина, так и геном ассоциированной

микробиоты способны наследоваться в ряду поколений, причём с определённой воспроизводимостью. Именно это свойство, в конечном счёте, и придаёт холобионту его уникальные черты. Ведущую роль в адаптационных механизмах и эволюционных преобразованиях холобионта выполняет его микробиом, что объясняется гораздо более высокой скоростью реагирования микробного компонента на флуктуации внешних условий по сравнению с геномом хозяина [7, 8].

Примечательно, что в экологии встречается феномен «тройственного единства», когда лишайники, каждый из которых несёт свой собственный эпифитный микробиом, колонизируют древесные стволы, выступая по отношению к ним в качестве эпифитов [9, 10]. При этом кора деревьев является также средой обитания для поверхностных микроорганизмов. В литературе представлены исследования, демонстрирующие тесную взаимосвязь между возрастной динамикой древесных пород и развитием эпифитного лишайникового покрова [11, 12]. Характер отношений между лишайниками и деревьями, выступающими в качестве субстрата, обусловлен совокупностью абиотических и биотических факторов, климатическими условиями, сезонностью, специфической экзометаболитов лишайника и высшего растения, особенностями химических и физических свойств коры деревьев [13]. Если морфометрическая изменчивость лишайников

достаточно широко представлена в опубликованных работах, то микробиомы лишайников и их субстратов остаются почти не изученными [14, 15]. Между тем морфометрические перестройки талломов как носителей поверхностной микробиоты и сопутствующие изменения их биохимических свойств могут непосредственно регулировать обилие и таксономическое разнообразие эпифитных организмов [16, 17]. Поэтому изучение количественного и группового состава эпифитных микробных комплексов лишайников и коры сосны, их химического состава открывает перспективу для применения в биодиагностике наряду с традиционными индикаторными системами. Данный подход актуален в биологическом мониторинге территорий экологически опасных объектов, особенно в постэксплуатационный период, так как эпифитные лишайники отличаются медленным метаболизмом и в течение длительного времени сохраняют последствия воздействия загрязнения атмосферного воздуха.

Целью работы является сравнительный анализ численности, структуры и состава эпифитной микробиоты лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. и его субстрата – коры сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., собранных с различных участков на территории, прилегающей к бывшему объекту уничтожения химического оружия.

Объекты и методы исследований

В Кировской области в 2015 г. завершена деятельность объектов хранения и уничтожения химического оружия (ХУХО) «Марядыковский». В настоящее время на данной территории создаётся производственно-технический комплекс (ПТК) по утилизации отходов I–II классов опасности. До начала деятельности объекта уничтожения химического оружия (ОУХО) была разработана система государственного экологического мониторинга, включающая 145 участков, на которых регулярно осуществлялись наблюдения за состоянием природных сред (почвы, атмосферного воздуха, поверхностных вод) и растительных объектов. После завершения функционирования объектов ХУХО в 2015 г. экологический мониторинг на данной территории продолжается до настоящего времени.

В 2025–2026 гг. одним из объектов исследования был эпифитный листоватый лишайник гипогимния вздутая (*Hypogymnia physodes* (L.) Nyl.), произрастающий на коре сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Лишайник отбирали на четырёх участках, входящих в систему экологического мониторинга. Участки расположены в направлении преобладающих ветров на данной территории: в южном, юго-восточном и северном, северо-восточном. Два участка (016 и 019) находятся к югу от бывших объектов ХУХО. Один из них (019) расположен в 890 м к югу от границы ОУХО и в 100 м к северу от железнодорожной магистрали федерального значения, другой участок (016) находится в 300 м к югу от этой магистрали. Два других участка располагаются к северу от бывших ОУХО: участок 004 находится на расстоянии 300 м от границы бывшего объекта УХО, а участок 244 – на расстоянии 1,1 км от него [18, 19] (рис. 1).

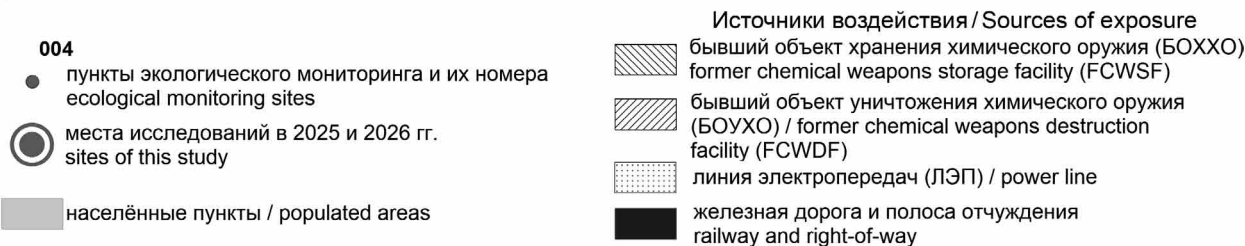
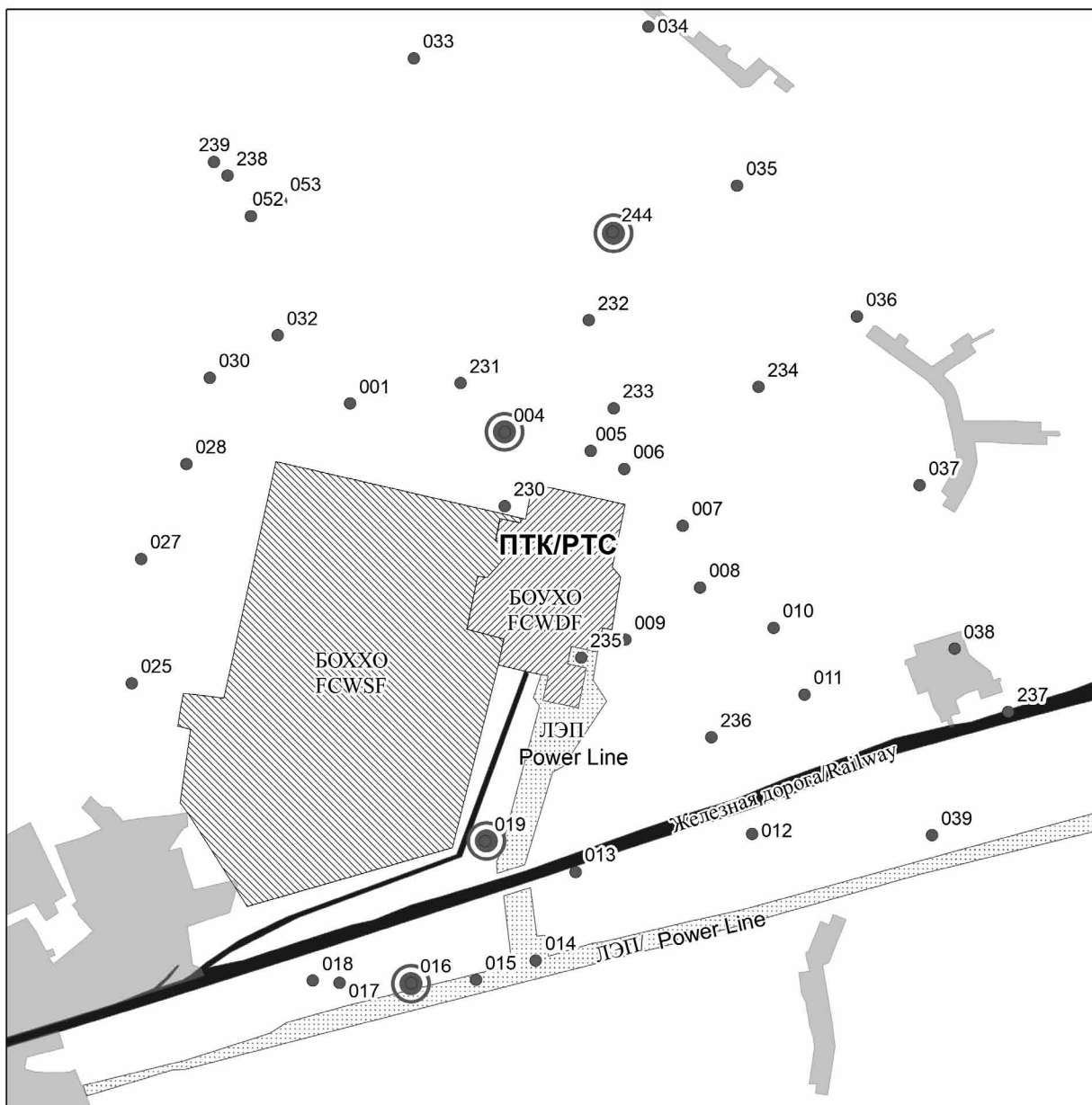
На исследуемых участках отбирали талломы *H. physodes* совместно с субстратом – корой *P. sylvestris* на высоте 1,0–1,5 м со всех сторон ствола не менее чем с 10 деревьев и объединяли в одну пробу. Общая масса каждой пробы лишайников, включая субстрат, составляла от 100 до 150 г.

Талломы лишайника отделяли от коры. Для определения численности эпифитных микроорганизмов в талломах лишайника и коре сосны применяли процедуру сепарации, основанную на отделении поверхностных микроорганизмов от субстратов при помощи смывов на качающей мешалке типа ЛАБ-ПУ-02 (Россия). Микробиологический анализ поверхностных смывов проводили методом последовательных разведений с дальнейшим высевом на селективные питательные среды: ГРМ-агар для бактерий-аммонификаторов, Эшби – для азотфиксаторов, Чапека – для микромицетов. Посев на каждую питательную среду проведён в трёхкратной повторности. Подсчёт выросших колоний после инкубации осуществлялся на 5–7 сутки.

Для проведения химического анализа талломы лишайника высушивали до воздушно-сухого состояния, отделяли от субстрата (коры сосны) и готовили навески массой по 10 г.

Элементный состав образцов талломов лишайника определяли атомно-эмиссионным (АЭС) и масс-спектральными методами анализа (МС) в соответствии с методикой измерений НСАМ № 499 – АЭС/МС в Аналитическом испытательном центре ФГБУН «Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН» (АСИЦ ИПТМ РАН, г. Черноголовка, Московская обл.).

Статистическую обработку результатов проводили с использованием программы



ПТК - производственно-технический комплекс / PTC - production and technical complex

Рис. 1. Схема расположения участков исследований
Fig. 1. Research site layout

Microsoft Excel. В таблицах и на рисунках, представленных в работе, указаны средние значения и стандартные отклонения. Также проведён корреляционный анализ между численностью эпифитных микробиомов лишайника и коры сосны.

Результаты и обсуждение

Численность и структура эпифитных микробных комплексов лишайника *H. physodes*. Результаты микробиологического анализа показали, что эпифитная микробиота листоватого лишайника характеризуется неодинаковым количественным обилием (рис. 2). На поверхности талломов лишайника *H. physodes*, отобранного на сосне с участка 004, суммарное обилие микроорганизмов в 2 и в 3 раза выше, чем в вариантах с участков 016, 019, 244. При этом в структуре эпифитных микроорганизмов на участке 004 в талломах лишайника преобладающее значение имели бактерии-аммонификаторы; доминирование которых ранее отмечалось в структуре эпифитной микробиоты других листоватых лишайников [20].

В талломах лишайника на участках 019 и 244 доминантной группой микроорганизмов оказались азотфиксаторы (рис. 3).

Анализ диаграмм (рис. 3) позволяет сделать вывод о том, что наиболее богата бактериями-аммонификаторами микробиота лишайника на участке 004 – самом ближнем к ОУХО, где с 2006 по 2015 гг. уничтожались фосфорорганические отравляющие вещества, содержащие мышьяк, серу и азот. В пробах лишайников, отобранных с сосны обыкновенной на более дальних от ОУХО участках (016, 019 и 244) в большей степени проявляют себя бактерии-азотфиксаторы.

Результаты химического анализа талломов лишайника *H. physodes*. Данные по содержанию тяжёлых металлов (ТМ) свидетельствуют о низкой концентрации их в талломах лишайника (табл. 1). Содержание хрома в лишайнике варьировало от 1,4 мг/кг сухой массы на участке 244 до 2,5 мг/кг – на участке 019. Наиболее высокое содержание кобальта (0,28 мг/кг), меди (4,8 мг/кг) и кадмия (0,46 мг/кг) также отмечено в пробе с участка 019, наиболее близко расположенного к объекту хранения химического оружия (ОХХО) и железнодорожной магистрали. Известно, что железнодорожный транспорт является источником загрязнения окружающей среды ТМ [18]. Образец лишайника с участка 004, расположенного с северной стороны от быв-

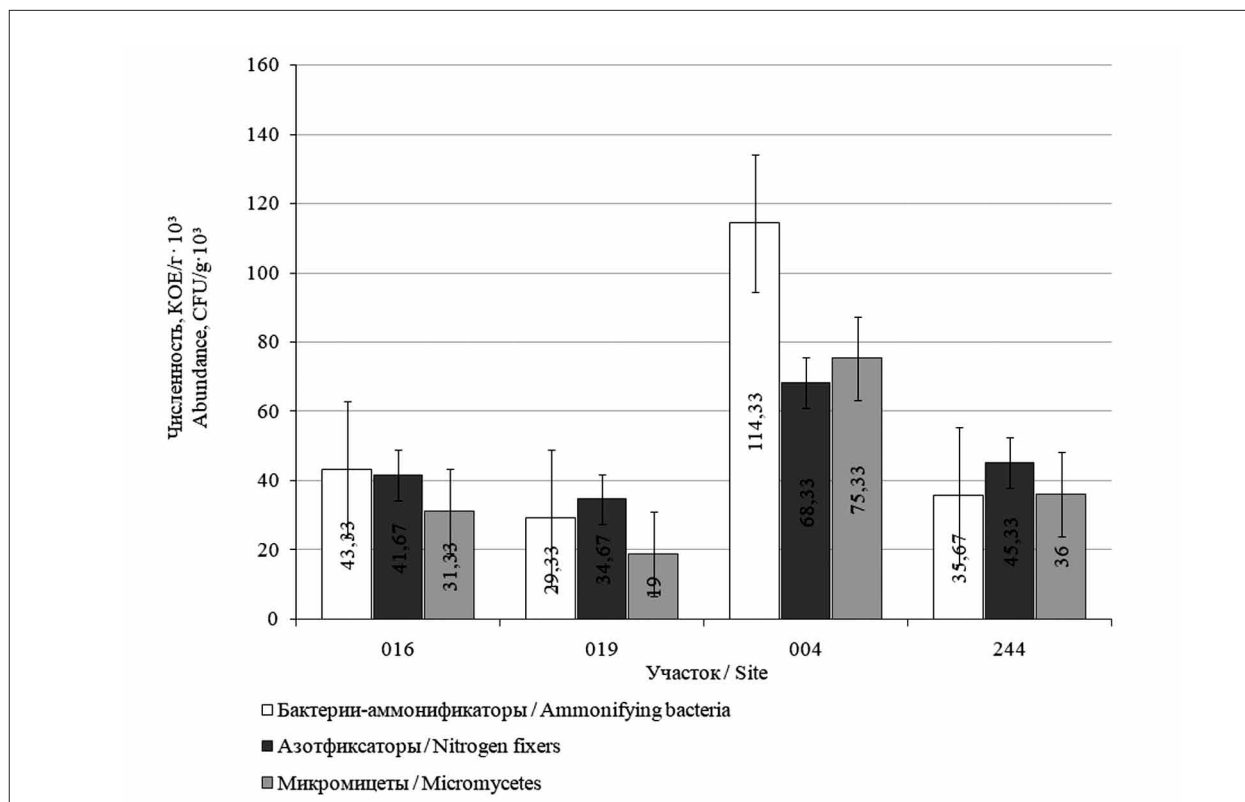


Рис. 2. Численность эпифитной микробиоты лишайника *H. physodes* (L.) Nyl. на разных участках
 Fig. 2. The abundance of *H. physodes* (L.) Nyl. epiphytic microbiota in different sites

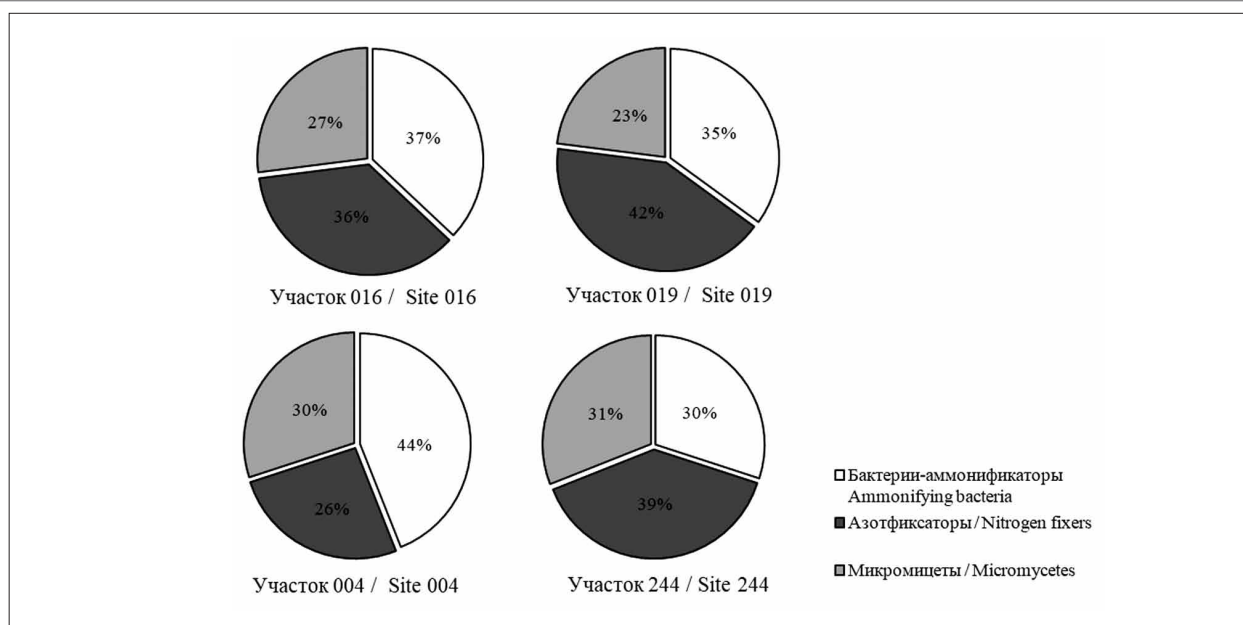


Рис. 3. Долевое соотношение различных микробных группировок эпифитных микроорганизмов лишайника *H. physodes* на разных участках / Fig. 3. The proportion of different microbial groups of *H. physodes* epiphytic microorganisms in different sites

Таблица 1 / Table 1

Содержание тяжёлых металлов в талломах лишайника *H. physodes* в мг/кг сухой массы
Heavy metal content in the *H. physodes* thalli, mg/kg of dry weight

| Участок / Site | Металл / Metal | | | | | | |
|---|----------------|------|-----|------|--------|------|-------|
| | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Cd | Pb |
| 016 | 1,9 | 0,23 | 1,3 | 3,8 | 55,4 | 0,23 | 2,9 |
| 019 | 2,5 | 0,28 | 1,3 | 4,8 | 55,0 | 0,46 | 2,7 |
| 004 | 1,9 | 0,18 | 1,6 | 3,8 | 45,1 | 0,35 | 3,3 |
| 244 | 1,4 | 0,22 | 1,3 | 4,1 | 44,9 | 0,36 | 2,1 |
| ПДК (ОФС.1.5.3.0009.15) MPC (OS.1.5.3.0009.15) | – | – | – | – | – | 1,0 | 6,0 |
| Среднемировое фоновое содержание / Global average background content [25] | 0–10 | – | 0–5 | 1–50 | 20–500 | 1–30 | 5–100 |

Примечание: «–» – данные отсутствуют / Note: “–” – no data.

шего ОУХО, характеризуется повышенным по сравнению с другими участками содержанием никеля (1,6 мг/кг) и свинца (3,3 мг/кг).

По содержанию в лишайнике *H. physodes* ТМ составлен следующий ряд: Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > Cd > Co. При этом, количество цинка на порядок выше содержания других исследуемых элементов, что вполне согласуется с данными литературы [21, 22].

В сравнении с другими видами эпигейных и эпифитных лишайников *H. physodes* способна накапливать большее количество ТМ [23], что широко используется в экологическом мониторинге техногенных территорий [24].

В целом на всех четырёх исследуемых участках содержание ТМ в лишайнике *H. physodes* не превышало значений ПДК

для лекарственного растительного сырья (ОФС.1.5.3.0009.15) и было в пределах значеный среднемировых фоновых концентраций в лишайниках [25].

У образцов лишайника *H. physodes*, на участках 004 и 244, расположенных севернее объекта ХУХО (рис. 1), отмечены наиболее высокие концентрации калия (3622 и 3223 мг/кг), магния (658 и 690 мг/кг), фосфора (732 и 909 мг/кг) и марганца (231 и 355 мг/кг) (табл. 2). Повышенное содержание в пробах лишайника серы (748 мг/кг) и железа (651 мг/кг) по сравнению с другими участками выявлено на участке 016 вблизи ЛЭП, а кальция (15458 мг/кг) и железа (994 мг/кг) – на участке 019, расположенном рядом с бывшим ОХХО и железной дорогой. Содержание железа соответствует

среднемировым значениям, в то время как содержание марганца в талломах лишайника, за исключением участка 016, расположенного на самом дальнем расстоянии от бывшего ОУХО, превышает среднемировые значения в 1,5–3 раза. Марганец в виде оксида марганца(II) содержался в выбросах ОУХО [26].

По содержанию в лишайниках макроэлементы составляют ряд Ca > K > P > S > Mg. Многие биогенные элементы, согласно проектной документации, содержались в составе выбросов бывшего ОУХО [26].

Данные по химическому составу лишайника *H. physodes* (табл. 2) сопоставимы

со среднемировыми значениями и данными других исследователей [21, 22, 27]. Крайне неравномерное пространственное распределение содержания элементов в лишайниках, вероятно, обусловлено влиянием объектов ХУХО и связанной с ними инфраструктуры.

Численность и структура эпифитных микробных комплексов коры *P. sylvestris*. Общая численность эпифитных микроорганизмов (аммонификаторов, азотфиксаторов и микромицетов) на коре сосны колебалась от самых больших значений – $58,34 \cdot 10^3$ КОЕ/г на участке 019 до $29 \cdot 10^3$ КОЕ/г на участке 004, т. е. разница в численности в 2 раза

Таблица 2 / Table 2

Содержание макро- и микроэлементов в талломах лишайника *H. physodes* в мг/кг сухой массы
Macro- and microelement content in the *H. physodes* thalli, mg/kg of dry mass

| Участок / Site | Элемент / Element | | | | | | |
|--|-------------------|------|-----|-----|-----|---------|--------|
| | Ca | K | Mg | P | S | Fe | Mn |
| 016 | 4438 | 3050 | 519 | 590 | 748 | 651 | 87 |
| 019 | 15458 | 2617 | 478 | 470 | 596 | 994 | 189 |
| 004 | 13593 | 3622 | 658 | 732 | 662 | 448 | 231 |
| 244 | 10031 | 3223 | 690 | 909 | 714 | 358 | 355 |
| Среднемировое содержание в <i>H. physodes</i> / Global average dry weight content in <i>H. physodes</i> [27] | – | – | – | – | – | 50–1600 | 10–130 |

Примечание: «–» – данные отсутствуют / Note: “–” – no data.

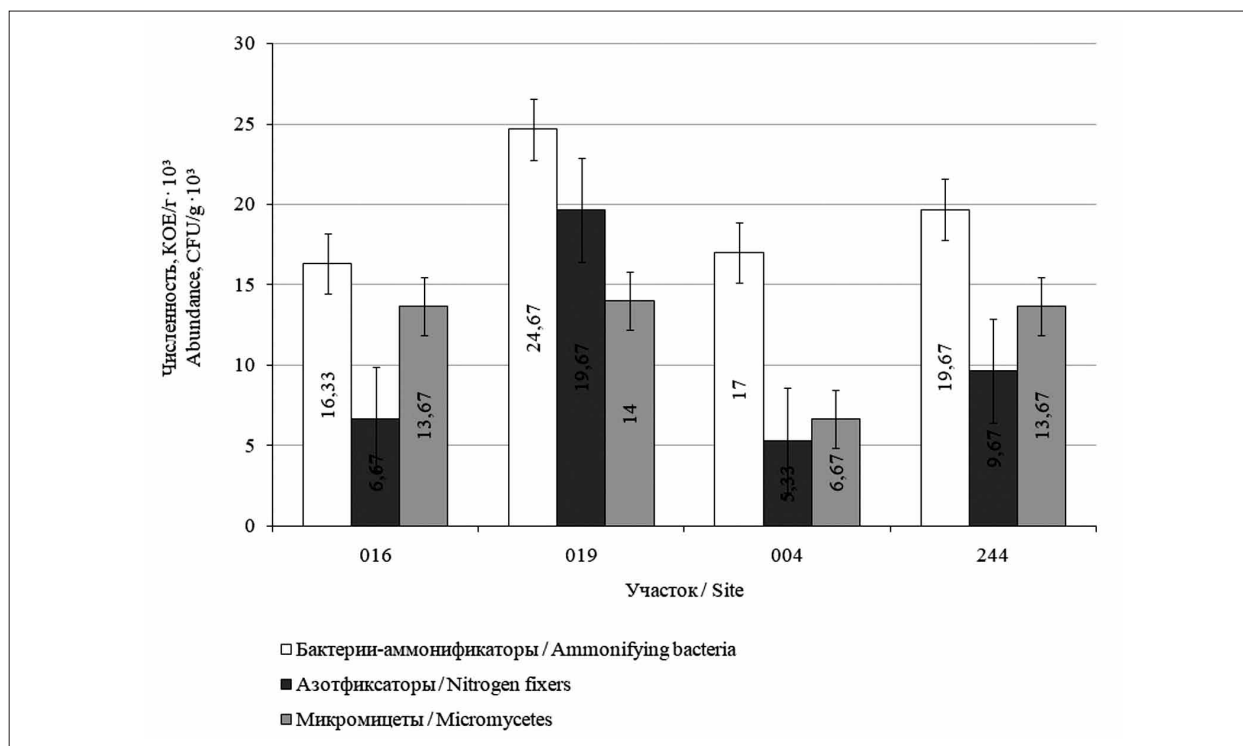


Рис. 4. Численность эпифитной микробиоты на коре *Pinus sylvestris* на разных участках
Fig. 4. The abundance of epiphytic microbiota on the *Pinus sylvestris* bark in different sites

(рис. 4). Следует отметить, что участок 019 расположен вблизи бывшего ОХХО, где химическое оружие (ХО) хранилось в закрытых помещениях более 60 лет, а участок 004 расположен рядом с бывшим ОУХО, на котором фосфорорганические отравляющие вещества уничтожались с 2006 по 2015 гг. Безусловно, в районе участка 004 в процессе уничтожения ХО техногенное воздействие на растительные сообщества, в том числе на эпифитный микробный комплекс коры сосны, могло оказать большее влияние, чем на участке 019.

Численность эпифитной микробиоты коры сосны *P. sylvestris* на участках 016, 019, 244 более высокая, чем на ближайшем к ОУХО участке 004, на котором выявлена самая низкая численность азотфиксаторов и микромицетов. Наиболее высокая численность эпифитной микробиоты коры сосны *P. sylvestris* отмечена на участке 019, расположенном вблизи железной дороги. Максимальное содержание азотфиксирующих бактерий выявлено на участке 004, ближайшем к объекту с северной стороны. Вероятно, это обусловлено максимальным накоплением азота в течение многих лет в талломах лишайника, а источником питания для эпифитной микробиоты коры сосны, находящейся под талломом, являются экзометаболиты гипогимнии, в состав которых входят органические азотсодержащие вещества, блокирующие размножение азотфиксаторов.

Кроме общей численности эпифитной микробиоты определено долевое соотношение микробных группировок эпифитных микроорганизмов коры сосны *P. sylvestris* на четырёх исследуемых участках (рис. 5).

Долевое соотношение микробных группировок эпифитных микроорганизмов на коре сосны *P. sylvestris* свидетельствует о том, что на всех четырёх участках численность бактерий-аммонификаторов имеет лидирующее значение: от 42 % на участке 019 до 59 % на участке 004, несколько ниже долевое участие микромицетов – от 23 до 37 %, минимальную долю на всех участках составляют азотфиксирующие бактерии (от 15 до 34 %).

Результаты комплексного анализа эпифитной микробиоты *H. physodes* и коры *P. sylvestris*. Изучение численности и группового состава микробных сообществ, ассоциированных с листоватым лишайником *H. physodes* и его субстратом – корой сосны *P. sylvestris*, выявило различия как между разными участками отбора проб, так и между талломами лишайника и корой (рис. 6). Численность эпифитного микробиома лишайников значительно превышает количественное обилие поверхностного микробиома коры сосны. По литературным данным в состав таллома лишайника входят разнообразные органические соединения (хитин, лихенин, гемицеллюлозы, пектин, дисахариды, полиспирты, аминокислоты, витамины, пигменты),

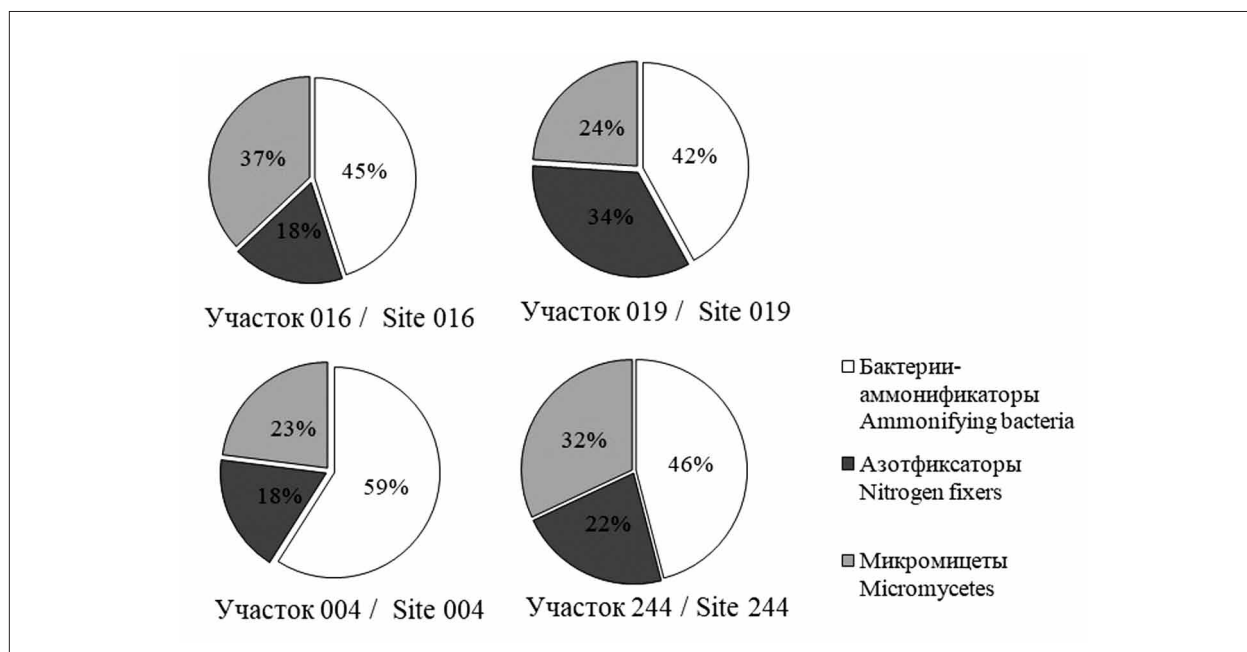


Рис. 5. Долевое соотношение различных микробных группировок эпифитных микроорганизмов коры *P. sylvestris* на разных участках / Fig. 5. The proportion of different epiphytic microbial groups on the *P. sylvestris* bark in different sites

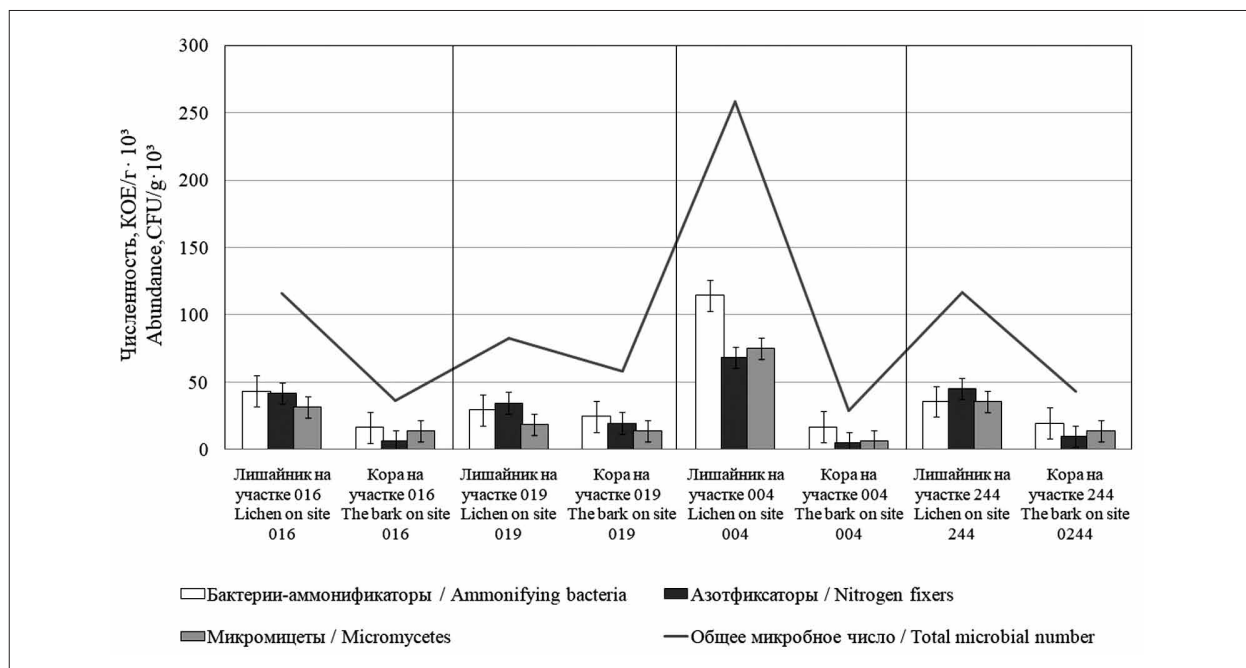


Рис. 6. Сравнительная характеристика эпифитных микробных комплексов лишайника *H. physodes* и коры *P. sylvestris* / Fig. 6. Comparative characteristics of epiphytic microbial complexes of the lichen *H. physodes* and the *P. sylvestris* bark

выполняющие как структурные функции, так и задействованные в клеточном метаболизме [28–30]. Богатый биохимический состав талломов создаёт благоприятные трофические условия для поверхностной микробиоты, обуславливая высокую численность эпифитных микроорганизмов.

Анализ данных рисунка 6 позволяет сделать вывод о количественном различии в содержании эпифитных микробных комплексов лишайника *H. physodes* и коры *P. sylvestris* в зависимости от места отбора проб. Весьма сходная картина наблюдается на удалённых лесных участках (016 и 244), Наиболее контрастным является микробиом лишайника *H. physodes* и коры *P. sylvestris* на участке 004 – самом ближайшем к бывшему ОУХО, в составе выбросов которого были как эссенциальные элементы (фосфор, сера, азот), так и токсичные (ТМ, мышьяк, фтор).

Длительное совместное произрастание лишайника на коре сосны предполагает наличие устойчивых связей как непосредственно между растительными организмами (таллом лишайника–кора сосны), так и между их микробиомами. Проведённый корреляционный анализ доказывает, что между общей численностью эпифитных микроорганизмов талломов лишайника и коры сосны существует статистическая связь с коэффициентами корреляции ($r = 0,98-0,92; p = 0,008$).

Таким образом, результаты корреляционного анализа ещё раз подчёркивают близость лишайников как эпифитов своему субстрату – коре сосны. Согласно теории холобионтов, в данном случае, вероятно, можно говорить не только о микробиоме коры сосны, но и о своеобразной тетраде: микробиом гипогимнии – гипогимния – микробиом коры сосны – кора сосны.

Заключение

Впервые был проведён микробиологический анализ двух эпифитных комплексов: *H. physodes* и коры сосны *P. sylvestris*, на которой сам лишайник обитает в качестве эпифита.

Сравнительный микробиологический анализ численности трёх физиологических групп микроорганизмов (аммонификаторов, азотфиксаторов и микромицетов), обитающих на поверхности талломов лишайника и подстилающего субстрата (коры сосны), показал существенное превышение микробного обилия эпифитов гипогимнии. Вероятно, это связано с тем, что питание лишайниковых эпифитов происходит как за счёт экзометаболитов гипогимнии, так и за счёт элементов, поступающих из воздуха. У эпифитов коры сосны источник питания единственный – выделение подкоровой части таллома лишайника, с недоступностью воздушного и субстратного

питания. Косвенным доказательством этого служит проведённый корреляционный анализ, который выявил высокую степень связи между численностью эпифитных микробов лишайника и коры сосны ($r = 0,98-0,92$).

Сопоставление элементного состава лишайников с обилием их эпифитной микробиоты на участках разного техногенного воздействия показало, что максимальная микробная численность ассоциируется с минимальным накоплением ТМ и максимальным содержанием эссенциальных элементов – Ca, Mg, K, P, S в талломе лишайника на ближнем к ОУХО участке 004, в прошлом наиболее подверженном воздействию атмосферных выбросов при уничтожении ХО.

Проведённые исследования открывают перспективы использования для диагностики состояния трансформированной природной среды не только талломов лишайников, но также их эпифитной микробиоты. Во многом это связано со способностью лишайников длительное время существовать на одном и том же субстрате (в данном случае коре сосны) и аккумулировать из атмосферного воздуха различные соединения, включая поллютанты техногенного происхождения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 125021402208-5).

Литература

1. Gauslaa Y., Lie M., Ohlson M. Epiphytic lichen biomass in a boreal Norway spruce forest // *The Lichenologist*. 2008. V. 40. No. 3. P. 257–266. doi: 10.1017/S0024282908007664
2. Bacon C.W., White J.F. Functions, mechanisms and regulation of endophytic and epiphytic microbial communities of plants // *Symbiosis*. 2016. V. 68. P. 87–98. doi: 10.1007/s13199-015-0350-2
3. Bordenstein S.R., Theis K.R. Host biology in light of the microbiome: ten principles of holobionts and hologenomes // *PLoS Biol*. 2015. V. 13. No. 8. P. e1002226. doi: 10.1371/journal.pbio.1002226
4. Guerrero R., Margulis L., Berlanga M. Symbiogenesis: the holobiont as a unit of evolution // *Int. Microbiol*. 2013. V. 16. No. 3. P. 133–143. doi: 10.2436/20.1501.01.188
5. Theis K.R., Dheilly N.M., Klassen J.L., Brucker R.M., Baines J.F., Bosch T.C.G., Cryan J.F., Gilbert S.F., Goodnight C.J., Lloyd E.A., Sapp J., Vandenkoornhuysen P., Zilber-Rosenberg I., Rosenberg E., Bordenstein S.R. Getting the hologenome concept right: an evolutionary framework for hosts and their microbio-

mes // *mSystems*. 2016. V. 1. No. 2. P. e00028-16. doi: 10.1128/mSystems.00028-16

6. Rosenberg E., Koren O., Reshef L., Efrony R., Zilber-Rosenberg I. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution // *Nat. Rev. Microbiol*. 2007. V. 5. No. 5. P. 355–362. doi: 10.1038/nrmicro1635

7. Zilber-Rosenberg I., Rosenberg E. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution // *FEMS Microbiol. Rev*. 2008. V. 32. No. 5. P. 723–735. doi: 10.1111/j.1574-6976.2008.00123.x

8. Gilbert S.F., Sapp J., Tauber A.I. A symbiotic view of life: we have never been individuals // *Q. Rev. Biol*. 2012. V. 87. No. 4. P. 325–341. doi: 10.1086/668166

9. Иржигитова Д.М., Мошкова М.А., Петрова Е.А., Корчиков Е.С. Кора деревьев и кустарников как субстрат для эпифитных лишайников в степной зоне (на примере Самарской области) // *Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия*. 2013. № 9/1 (110). С. 151–157.

10. Muchnik E.E., Blagoveshchenskaya E.Yu. Distribution of epiphytic lichens along a tree's trunk // *Russian Journal of Ecology*. 2022. V. 53. No. 6. P. 448–455. doi: 10.1134/s106741362206011x

11. Cleavitt N.L., Dibble A.C., Werier D.A. Influence of tree composition upon epiphytic macrolichens and bryophytes in old forests of Acadia National Park, Maine // *The Bryologist*. 2009. V. 112. No. 3. P. 467–487. doi: 10.1639/0007-2745-112.3.467

12. Жукова Л.А., Нотов А.А. О проблеме сопряженного анализа онтогенеза дерева и динамики эпифитного мохово-лишайникового покрова // *Полевой журнал биолога*. 2020. Т. 2. № 4. С. 310–320. doi: 10.18413/2658-3453-2020-2-4-310-320

13. Kovaleva N.M., Ivanova G.A. Features of the biomass distribution of epiphytic lichens on Scotch pine (Lower Angara region) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2012. V. 5. No. 3. P. 319–322. doi: 10.1134/S1995425512030080

14. Суетина Ю.Г. Изменчивость морфометрических признаков *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., произрастающей на берёзе повислой с разным положением на стволе и в рельефе // *Самарский научный вестник*. 2024. Т. 13. № 4. С. 42–46. doi: 10.55355/snv2024134106

15. Суетина Ю.Г. Морфометрическая реакция лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. в придорожных сосняках на разный уровень автомобильного загрязнения // *Самарский научный вестник*. 2025. Т. 14. № 4. С. 64–68. doi: 10.55355/snv2025144107

16. Бровко О.С., Слобода А.А., Жильцов Д.В., Бойцова Т.А., Пустынная М.А., Ивахнов А.Д. Выделение биологически активных веществ фенольной природы из лишайника *Hypogymnia physodes* // *Химия растительного сырья*. 2023. № 4. С. 155–164. doi: 10.14258/jcrpm.20230412826

17. Дейнеко И.П., Дейнеко И.В., Белов Л.П. Исследование химического состава коры сосны // *Химия растительного сырья*. 2007. № 1. С. 19–24.

18. 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

19. Ашихмина Т.Я., Домрачева Л.И., Домнина Е.А., Кантор Г.Я., Кочурова Т.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Панфилова И.В. Система биологического мониторинга компонентов природной среды в районе объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 4. С. 32–38. doi: 10.25750/1995-4301-2008-4-032-38

20. Скугорева С.Г., Домрачева Л.И., Фокина А.И., Домнина Е.А., Кулаков В.Н., Коротких А.И., Ашихмина Т.Я. Сравнительный анализ химического состава и особенностей поверхностных микробных комплексов лишайников и субстратов их произрастания // Химия растительного сырья. 2022. № 1. С. 141–152. doi: 10.14258/jcrpm.20220110122

21. Табаленкова Г.Н., Далькэ И.В., Головки Т.К. Элементный состав биомассы некоторых видов лишайников бореальной зоны на Европейском Северо-Востоке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 221–225.

22. Катаева М.Н., Беляева А.И. Накопление тяжёлых металлов в эпифитных лишайниках ельника подзоны средней тайги // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 7. С. 17–21. doi: 10.17513/mjprfi.13242

23. Жидков А.Н. Накопление химических веществ эпифитными и эпигейными лишайниками сосновых насаждений в условиях техногенного загрязнения среды // Лесной вестник. 2008. № 1. С. 151–156.

24. Трифонова Т.А., Салмин А.С. Использование лишайника *Hypogymnia physodes* в качестве аккумулятивного биоиндикатора техногенного загрязнения атмосферы // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. № 2. С. 150–163. doi: 10.18470/1992-1098-2019-2-150-163

25. Meysurova A.F., Notov A.A. Metal and metalloid contents in lichens from specially protected conservation areas // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 58–65. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-058-065

26. Ашихмина Т.Я. Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия. Киров: Вятка, 2002. 544 с.

27. Nieboer E., Richardson D.H.S., Tomassini F.D. Mineral uptake and release by lichens: an overview // Bryologist. 1978. V. 81. No. 2. P. 226–246. doi: 10.2307/3242185

28. Podterob A.P. Chemical composition of lichens and their medical applications // Pharm. Chem. J. 2008. V. 42. P. 582–588. doi: 10.1007/s11094-009-0183-5

29. Бровко О.С., Паламарчук И.А., Слобода А.А., Бойцова Т.А., Гагущкина А.А., Вальчук Н.А. Влияние стрессовых воздействий на компонентный состав

лишайников рода *Cladonia* Евроарктического региона // Успехи современного естествознания. 2016. № 8. С. 20–24. doi: 10.17513/use.36072

30. Latkowska E., Bober B., Chrapusta E., Adamski M., Kaminski A., Bialczyk J. Secondary metabolites of the lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. and their presence in spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) bark // Phytochemistry. 2015. V. 118. P. 116–123. doi: 10.1016/j.phytochem.2015.08.016

References

1. Gauslaa Y., Lie M., Ohlson M. Epiphytic lichen biomass in a boreal Norway spruce forest // The Lichenologist. 2008. V. 40. No. 3. P. 257–266. doi: 10.1017/S0024282908007664

2. Bacon C.W., White J.F. Functions, mechanisms and regulation of endophytic and epiphytic microbial communities of plants // Symbiosis. 2016. V. 68. P. 87–98. doi: 10.1007/s13199-015-0350-2

3. Bordenstein S.R., Theis K.R. Host biology in light of the microbiome: ten principles of holobionts and hologenomes // PLoS Biol. 2015. V. 13. No. 8. P. e1002226. doi: 10.1371/journal.pbio.1002226

4. Guerrero R., Margulis L., Berlanga M. Symbiogenesis: the holobiont as a unit of evolution // Int. Microbiol. 2013. V. 16. No. 3. P. 133–143. doi: 10.2436/20.1501.01.188

5. Theis K.R., Dheilly N.M., Klassen J.L., Brucker R.M., Baines J.F., Bosch T.C.G., Cryan J.F., Gilbert S.F., Goodnight C.J., Lloyd E.A., Sapp J., Vandenkoornhuysen P., Zilber-Rosenberg I., Rosenberg E., Bordenstein S.R. Getting the hologenome concept right: an eco-evolutionary framework for hosts and their microbiomes // mSystems. 2016. V. 1. No. 2. P. e00028-16. doi: 10.1128/mSystems.00028-16

6. Rosenberg E., Koren O., Reshef L., Efrony R., Zilber-Rosenberg I. The role of microorganisms in coral health, disease and evolution // Nat. Rev. Microbiol. 2007. V. 5. No. 5. P. 355–362. doi: 10.1038/nrmicro1635

7. Zilber-Rosenberg I., Rosenberg E. Role of microorganisms in the evolution of animals and plants: the hologenome theory of evolution // FEMS Microbiol. Rev. 2008. V. 32. No. 5. P. 723–735. doi: 10.1111/j.1574-6976.2008.00123.x

8. Gilbert S.F., Sapp J., Tauber A.I. A symbiotic view of life: we have never been individuals // Q. Rev. Biol. 2012. V. 87. No. 4. P. 325–341. doi: 10.1086/668166

9. Irzhigitova D.M., Moshkova M.A., Petrova E.A., Korchikov E.S. Bark of trees and bushes as the substratum for epiphytic lichens in the steppe zone (on the example of the Samara region) // Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya. 2013. No. 9/1 (110). P. 151–157 (in Russian).

10. Muchnik E.E., Blagoveshchenskaya E.Yu. Distribution of epiphytic lichens along a tree's trunk // Russian

- Journal of Ecology. 2022. V. 53. No. 6. P. 448–455. doi: 10.1134/s106741362206011x
11. Cleavitt N.L., Dibble A.C., Werier D.A. Influence of tree composition upon epiphytic macrolichens and bryophytes in old forests of Acadia National Park, Maine // *The Bryologist*. 2009. V. 112. No. 3. P. 467–487. doi: 10.1639/0007-2745-112.3.467
 12. Zhukova L.A., Notov A.A. On the problem of conjugate analysis of tree ontogenesis and dynamics of epiphytic moss-lichen cover // *Field Biologist Journal*. 2022. V. 2. No. 4. P. 310–320 (in Russian). doi: 10.18413/2658-3453-2020-2-4-310-320
 13. Kovaleva N.M., Ivanova G.A. Features of the biomass distribution of epiphytic lichens on Scotch pine (Lower Angara region) // *Contemporary Problems of Ecology*. 2012. V. 5. No. 3. P. 319–322. doi: 10.1134/S1995425512030080
 14. Suetina Yu.G. Variability of morphometric traits of *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., growing on *Betula pendula* with different positions on the trunk and in the relief // *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2024. V. 13. No. 4. P. 42–46 (in Russian). doi: 10.55355/snv2024134106
 15. Suetina Yu. G. Morphometric response of the lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. in roadside pine forests to different levels of vehicle pollution // *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2025. V. 14. No. 4. P. 64–68 (in Russian). doi: 10.55355/snv2025144107
 16. Brovko O.S., Sloboda A.A., Zhil'tsov D.V., Boytsova T.A., Pustynnaya M.A., Ivakhnov A.D. Isolation of biologically active substances of phenolic nature from the lichen *Hypogymnia physodes* // *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2023. No. 4. P. 155–164 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20230412826
 17. Deyneko I.P., Deyneko I.V., Belov L.P. Investigation of the chemical composition of pine bark // *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2007. No. 1. P. 19–24 (in Russian).
 18. 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
 19. Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Domnina E.A., Kantor G.Ya., Kotchurova T.I., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.Yu., Olkova A.S., Panfilova I.V. Biological monitoring system of natural environment components in the chemical weapon storage and destruction object “Maradikovskiy” in the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 4. P. 32–38 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-4-032-38
 20. Skugoreva S.G., Domracheva L.I., Fokina A.I., Domnina E.A., Kulakov V.N., Korotkikh A.I., Ashikhmina T.Y. Comparative analysis of the chemical composition and features of surface microbial complexes of lichens and their growing substrates // *Khimija rastitel'nogo syr'ja*. 2022. No. 1. P. 141–152 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20220110122
 21. Tabalenkova G.N., Dalke I.V., Golovko T.K. Biomass elemental composition of some lichen species in the Boreal zone of European North-East // *Izvestiya of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. V. 18. No. 2. P. 221–225 (in Russian).
 22. Kataeva M.N., Belyaeva A.I. Accumulation of heavy metals in epiphytic lichens in spruce forest of middle taiga subzone // *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2021. No. 7. P. 17–21 (in Russian). doi: 10.17513/mjphi.13242
 23. Zhidkov A.N. Accumulation of chemicals by epiphytic and epigeic lichens of pine plantations under conditions of anthropogenic environmental pollution // *Lesnoy Vestnik*. 2008. No. 1. P. 151–156 (in Russian).
 24. Trifonova T.A., Salmin A.S. Application of the *Hypogymnia physodes* lichen as an accumulative bioindicator of anthropogenic atmosphere pollution // *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*. 2019. V. 14. No. 2. P. 150–163 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2019-2-150-163
 25. Meysurova A.F., Notov A.A. Metal and metalloid contents in lichens from specially protected conservation areas // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 58–65. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-058-065
 26. Ashikhmina T.Y. Comprehensive environmental monitoring of chemical weapons storage and destruction facilities. Kirov: Vyatka, 2002. 544 p. (in Russian).
 27. Nieboer E., Richardson D.H.S., Tomassini F.D. Mineral uptake and release by lichens: an overview // *Bryologist*. 1978. V. 81. No. 2. P. 226–246. doi: 10.2307/3242185
 28. Podterob A.P. Chemical composition of lichens and their medical applications // *Pharm. Chem. J*. 2008. V. 42. P. 582–588. doi: 10.1007/s11094-009-0183-5
 29. Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Sloboda A.A., Boytsova T.A., Gagushkina A.A., Valchuk N.A. The influence of stress factors on the chemical composition of lichens genus *Cladonia* of Euro-Arctic region // *Advances in current natural sciences*. 2016. No. 8. P. 20–24 (in Russian). doi: 10.17513/use.36072
 30. Latkowska E., Bober B., Chrapusta E., Adamski M., Kaminski A., Bialczyk J. Secondary metabolites of the lichen *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl. and their presence in spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.) bark // *Phytochemistry*. 2015. V. 118. P. 116–123. doi: 10.1016/j.phytochem.2015.08.016

Амфифильные свойства почвенного органического вещества в первые годы после рубки древостоя

© 2026. В. В. Старцев, к. б. н., н. с.,

А. А. Дымов, д. б. н., зав. отделом,

Институт биологии ФИЦ Коми научного центра УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: vik.startsev@gmail.com

В работе представлены данные по амфифильности органического вещества подзолистых почв (Retisols) после сплошнолесосечной рубки с применением многооперационных комплексов харвестер/форвардер. Исследование проводилось на разных технологических элементах вырубki: пасечный участок и волока (3П – три прохода лесозаготовительной техники, 10П – десять проходов, 10Р – с последующим выравниванием). Для изучения амфифильных свойств почвенного органического вещества (ПОВ) был использован метод хроматографии гидрофобного взаимодействия. Установлено, что для всех участков наблюдается высокое содержание гидрофильных фракций ПОВ, отличающихся высокой миграционной и реакционной способностью, как в подстилках, так и в минеральных горизонтах. Их доля увеличивается в процессе лесовозобновления. Гидрофобные фракции, состоящие из лигнинсодержащих соединений, имеют высокую степень корреляции с общим содержанием углерода в почве ($r = 0,69-0,77, p < 0,05$), общим содержанием азота ($r = 0,66-0,79, p < 0,05$) и водорастворимой фракцией углерода ($r = 0,45-0,74, p < 0,05$). Показано, что органическое вещество чутко реагирует на антропогенную нагрузку на уровне содержания амфифильных фракций, поскольку они существенно различаются от исходных показателей после сплошнолесосечной рубки. Происходит накопление гидрофобных лигнинсодержащих фракций, образующихся в результате разложения растительных остатков, в почвах волоков вследствие механического перемешивания верхних минеральных горизонтов с подстилкой после прохождения тяжёлой колёсной техники.

Ключевые слова: сплошная рубка, хроматография гидрофобного взаимодействия, подзолистые почвы.

Amphiphilic properties of soil organic matter in the first years after stand cutting

© 2026. V. V. Startsev ORCID: 0000-0002-6425-6502

A. A. Dymov ORCID: 0000-0002-1284-082x

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: vik.startsev@gmail.com

The cutting industry is one of the factors that makes a significant contribution to the disruption of forest ecosystems. The aim of the work is to study the hydrophilic and hydrophobic components of organic matter in soils after cutting. The paper presents data on amphiphilicity of organic matter of podzolic soils (Retisols) after clear-cutting with the use of multi-operational harvester/forwarder complexes. The study was conducted on different technological elements of clearcutting: apiary plot and drags (3P – three passes of harvesting equipment, 10P – ten passes, 10R – followed by leveling). Hydrophobic interaction chromatography was used to study the amphiphilic properties of soil organic matter (SOM). It was found that for all sites there is a high content of hydrophilic fractions characterized by high migration and reactivity, both in litter and mineral horizons. Their share increases in the process of reforestation. There is an accumulation of hydrophobic lignin-containing fractions formed as a result of decomposition of plant residues in the soils of windrows. It was found that hydrophobic fractions consisting of lignin-containing compounds have a high degree of correlation with total soil carbon ($r = 0.69-0.77, p < 0.05$), total nitrogen ($r = 0.66-0.79, p < 0.05$) and water-soluble carbon fraction ($r = 0.45-0.74, p < 0.05$). It is shown that organic matter reacts sensitively to anthropogenic load at the level of amphiphilic fractions content, as it significantly differs from the initial indicators after clear-cutting. The accumulation of hydrophobic lignin-containing fractions, formed as a result of decomposition of plant residues, occurs in the soils of windrows as a result of mechanical mixing of the upper mineral horizons with the litter as a result of the passage of heavy wheeled machinery.

Keywords: continuous cutting, hydrophobic interaction chromatography, Retisols.

Лесозаготовительная промышленность является одним из факторов, который вносит весомый вклад в нарушение лесных экосистем [1–4]. Для Республики Коми (РК) перво-степенное значение имеют лесные почвы, поскольку более 75 % площади региона относится к землям лесного фонда [5]. В результате проведения рубок происходит существенное нарушение почвенного и растительного покрова, что сказывается на процессах последующего восстановления растительности [6, 7]. Изменение качественного и количественного составов опада приводит к трансформации почвенного органического вещества (ПОВ). Процессы трансформации ПОВ в почвах при естественном возобновлении растительности на вырубках исследованы незначительно [3], в связи с чем необходимы знания об особенностях строения и свойствах ПОВ для оценки возможного изменения при антропогенном воздействии.

Одной из существенных характеристик ПОВ является способность проявлять гидрофобные и гидрофильные свойства. Амфифильные свойства являются важной характеристикой ПОВ, они обуславливают способность органических соединений мигрировать в водных потоках или же аккумулироваться в месте своего образования [8–11]. Кроме этого, щёлочерастворимые органические соединения могут реагировать на динамику внешних факторов и являться индикатором качества почв [12, 13].

Целью работы является изучение изменений амфифильных свойств органического вещества почв в процессе естественного лесовозобновления в первые годы после рубки хвойно-лиственного древостоя.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были выбраны подзолистые почвы, формирующиеся в средней тайге европейского северо-востока России (Сыктывдинский район, РК). Объект исследования был подробно описан в работе [14]. Была исследована типичная подзолистая почва под исходным лиственно-хвойным насаждением (ИЛ), который в дальнейшем (зима 2020 г.) был вырублен. Спустя три года после рубки (лето 2023 г.) были исследованы почвы на пасечном участке (П), на участке волока с тремя проходами форвардера (ЗП), участке волока с десятью проходами (10П) и участке волока с десятью проходами и с последующим выравниванием (10Р). Анализировали подстилку и верхние минеральные

горизонты. Подстилку делили на несколько подгоризонтов по степени разложения растительных остатков согласно [15, 16].

Для изучения амфифильных компонентов ПОВ использовали жидкостную хроматографию гидрофобного взаимодействия (ЖХГВ). Хроматографическое фракционирование проводили на колонке 1×10 см с гидрофобизированным гелем агарозы (Octyl Sepharose CL-4B, Pharmacia) на хроматографе BioLogic LP (BioRad, USA). Оптическую плотность элюата измеряли при $\lambda = 280$ нм. Анализировали щёлочные экстракты (0,1 н NaOH) в соотношении почва:раствор (1:10), время хроматографирования 85 мин. От минеральных примесей экстракт и растворённые препараты очищали центрифугированием (10000 об./мин, в течение 20 мин). Гидрофильные компоненты первой фракции не взаимодействуют с хроматографической матрицей и элюируются первыми при взаимодействии со стартовым буфером (А) – 0,05 моль/дм³ Трис-НСl⁺² моль/дм³ (NH₄)₂SO₄, рН 8,0. Элюирование органических компонентов, сорбированных на матрице геля, осуществляли путём постепенного ослабления их гидрофобных контактов с матрицей геля: сначала 0,05 моль/дм³ Трис-НСl (буфер В, рН 8,0) при негативном градиенте буфера А (вторая фракция), третью фракцию отделяли 100 %-ным буфером В. При возрастающей концентрации додецилсульфата натрия (0,05 моль/дм³ Трис-НСl+0,25 % SDS, буфер С, рН 8,0) элюировали четвёртую фракцию. Последнюю фракцию десорбировали раствором 5 ммоль/дм³ ЭТДА+0,2 н NaOH (буфер D). Особенности используемого метода подробно описаны ранее [8]. Относительное содержание амфифильных фракций определяли по площади каждой хроматографической фракции, выраженной в процентах от общей площади хроматографических пиков, с помощью программы обработки данных МультиХром (Амперсенд, Россия). Степень гидрофильности (D_н) определяли как отношение суммы площадей гидрофильных к сумме площадей гидрофобных компонентов.

Компоненты органического вещества, входящие в первые две хроматографические фракции, отнесены к гидрофильным; в составе третьей, четвёртой и пятой хроматографических фракций – к гидрофобным. Гидрофильные фракции представлены низкомолекулярными, насыщенными азотом алифатическими соединениями, третья и четвёртая фракции представлены высокомолекулярными органическими соединениями ароматической природы. В

четвёртой фракции преимущественно присутствуют лигниноподобные соединения. Пятая фракция представлена компонентами, связанными с железом и алюминием. Гидрофильные органические соединения преимущественно представлены миграционно-способными соединениями, которые хорошо растворяются в водных растворах и включают в себя основной запас легкодоступных питательных веществ. Гидрофобные фракции (третья-пятая) представлены биополимерами различной степени разложения и обладают возможностями закрепления на минеральной матрице почв.

Построение графиков и таблиц осуществляли с использованием Microsoft Excel 2010

(Microsoft, США). Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона (r) и построены корреляционные матрицы в программе STATISTICA 10 (Stat. Soft Inc., Tulsa, OK, США). Различия считались значимыми при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Работа представляет собой часть большого исследования по оценке влияния тяжёлой лесозаготовительной деятельности на почвы и ПОВ. Детально с описанием эксперимента и первыми опубликованными результатами можно ознакомиться в работах [14, 17–20].

Таблица 1 / Table 1

Доля амфифильных фракций и степень гидрофильности (D_H) в составе почвенного органического вещества (ПОВ) / Proportion of amphiphilic fractions and hydrophilicity degree (D_H) in soil organic matter (SOM) composition

| Участок Site | Год Year | Горизонт Horizon | Глубина, см Depth, cm | Номер хроматографической фракции Chromatographic fraction number | | | | | D_H |
|-----------------|-------------|---------------------|-----------------------------|---|------------|-----------------|-------------|-------------|-------|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| ИЛ OF | 2020 | O(L) | 0–1 | 41,9 ± 3,0 | 18,7 ± 1,2 | 13,1 ± 0,9 | 21,2 ± 1,4 | 5,1 ± 0,3 | 1,5 |
| | | O(F) | 1–4 | 37,2 ± 2,5 | 18,8 ± 1,3 | 11,1 ± 0,7 | 28,2 ± 1,9 | 4,7 ± 0,3 | 1,3 |
| | | O(H) | 4–5 | 37,9 ± 3,0 | 26,2 ± 1,7 | 17,1 ± 1,1 | 17,0 ± 1,1 | 1,70 ± 0,11 | 1,8 |
| | | EL1 | 5–20 | 7,3 ± 0,5 | 21,4 ± 1,4 | 15,6 ± 1,0 | 12,6 ± 0,8 | 43,1 ± 2,9 | 0,4 |
| | | EL2 | 20–45 | 32,8 ± 2,2 | 2,0 ± 1,4 | 1,5 ± 0,1 | 3,8 ± 0,3 | 60 ± 4 | 0,5 |
| П UDFA | 2023 | O(L) | 0–4 | 51,8 ± 3,0 | 12,1 ± 0,8 | 9,9 ± 0,7 | 24,2 ± 1,6 | 2,00 ± 0,13 | 1,8 |
| | | O(F) | 4–7 | 48,4 ± 3,0 | 17,6 ± 1,2 | 9,0 ± 0,6 | 22,8 ± 1,5 | 2,30 ± 0,15 | 1,9 |
| | | O(H) | 7–10 | 52,2 ± 3,0 | 19,2 ± 1,3 | 13,3 ± 0,9 | 13,8 ± 0,9 | 1,50 ± 0,10 | 2,5 |
| | | EL1 | 10–13(14) | 59 ± 4 | 15,6 ± 1,0 | – | 14,0 ± 0,9 | 11,2 ± 0,7 | 3,0 |
| | | EL2 | 13(14)–33 | 50,7 ± 3,0 | 23,4 ± 1,6 | – | 3,80 ± 0,30 | 22,1 ± 1,5 | 2,9 |
| ЗП ЗР | 2021 | O(L) | 0–2 | 32,9 ± 2,2 | 16,9 ± 1,1 | 12,9 ± 0,9 | 33,1 ± 2,2 | 4,20 ± 0,30 | 1,0 |
| | | O(F+H) | 2–5 | 24,8 ± 1,6 | 23,8 ± 1,6 | 25,2 ± 1,7 | 22,7 ± 1,5 | 3,70 ± 0,30 | 0,9 |
| | | EL1 | 5–15 | 44,2 ± 3,0 | 23,0 ± 1,5 | 0,2000 ± 0,0010 | 6,5 ± 0,4 | 26,1 ± 1,7 | 2,0 |
| | | EL2 | 15–25 | 10,0 ± 0,7 | 25,1 ± 1,7 | – | 3,42 ± 0,23 | 62 ± 4 | 0,5 |
| | 2023 | O(L) | 0–3 | 36,0 ± 2,4 | 14,2 ± 0,9 | 8,7 ± 0,6 | 39,0 ± 2,6 | 2,04 ± 0,14 | 1,0 |
| | | O(F+H) | 3–10 | 33,3 ± 2,2 | 16,8 ± 1,1 | 21,3 ± 1,4 | 26,6 ± 1,8 | 1,92 ± 0,13 | 1,0 |
| | | EL1 | 10–15 | 46,5 ± 3,0 | 14,5 ± 1,0 | 0,2000 ± 0,0010 | 7,3 ± 0,5 | 31,6 ± 2,1 | 1,6 |
| EL2 | 15–40 | 26,8 ± 1,8 | 31,5 ± 2,1 | – | 15,5 ± 1,0 | 26,2 ± 1,7 | 1,4 | | |
| 10П 10Р | 2021 | TUR | 0–15 | 39,3 ± 3,0 | 16,3 ± 1,1 | 5,0 ± 0,3 | 0,60 ± 0,04 | 38,8 ± 3,0 | 1,3 |
| | | EL | 15–20 | 35,7 ± 2,4 | 15,5 ± 1,0 | – | 18,4 ± 1,2 | 30,3 ± 2,0 | 1,1 |
| | 2023 | O(L) | 0–1 | 45,8 ± 3,0 | 12,8 ± 0,9 | 20,5 ± 1,4 | 18,5 ± 1,2 | 2,45 ± 0,16 | 1,4 |
| | | TUR | 1–15 | 43,5 ± 3,0 | 10,1 ± 0,7 | 20,3 ± 1,4 | 22,7 ± 1,5 | 3,40 ± 0,23 | 1,2 |
| EL | 15–20 | 42,0 ± 3,0 | 6,0 ± 0,4 | – | 6,0 ± 0,4 | 12,9 ± 0,9 | 2,2 | | |
| 10Р 10R | 2021 | TUR | 0–10 | 27,1 ± 1,8 | 51,4 ± 3,0 | – | 8,1 ± 0,5 | 13,5 ± 0,9 | 3,6 |
| | | BEL | 10–20 | 26,0 ± 1,7 | 56 ± 4 | – | 4,30 ± 0,30 | 14,1 ± 0,9 | 4,4 |
| | 2023 | TUR | 0–20 | 58 ± 4 | 21,7 ± 1,4 | – | 8,3 ± 0,6 | 12,0 ± 0,8 | 3,9 |
| | | BEL | 20–60 | 17,6 ± 1,1 | – | – | 43,9 ± 3,0 | 38,6 ± 3,0 | 0,3 |

Примечание: ИЛ – исходный лес, П – пасечный участок, ЗП – участок волока с тремя проходами форвардера, 10П – участок волока с десятью проходами, 10Р – участок волока с десятью проходами и с последующим выравниванием, прочерк – не обнаружено, $n = 3$. / Note: OF – original forest, UDFA – undisturbed felling area, ЗР – skidding trail after three forwarder passes, 10Р – skidding trail after ten forwarder passes, 10R – skidding trail after ten forwarder passes and surface leveling (reclamation). Dash – not detected. $n = 3$.

Анализ гидрофобно-гидрофильного состава щёлочерастворимого органического вещества почв исследуемых участков позволил оценить поведение ПОВ в процессе лесовозобновления после проведения рубок. Установлено, что для всех участков наблюдается высокое содержание гидрофильных фракций, как в подстилке, так и в минеральных горизонтах (табл. 1). Наибольшее содержание пятой хроматографической фракции характерно для минеральных горизонтов. Доля амфифильных компонентов в составе ПОВ представлена в таблице 1. В составе гидрофильных компонентов преобладает первая фракция (до 59 %). Это согласуется с проведёнными ранее исследованиями для почв РК [11, 21].

Отмечено, что после рубки происходит перераспределение гидрофильно-гидрофобных компонентов органического вещества в почвах. После рубки в почве пасечного участка наблюдалось увеличение гидрофильных фракций в органогенном горизонте по сравнению

с исходными значениями и уменьшение доли гидрофобных компонентов (рис.).

В минеральных горизонтах пасечного участка спустя три года после рубки выявлено двукратное увеличение доли первой и второй фракций (75 %) по сравнению с участком до рубки (32 %). Это, вероятно, связано с дополнительным поступлением органики с порубочными остатками и трансформацией свежего опада. Важным отличием участка пасеки от исходного леса является отсутствие третьей гидрофобной фракции в минеральных горизонтах и уменьшение доли соединений пятой фракции, связанной с железом и алюминием.

Для почвы участка с тремя проходами колёсной техники (ЗП) установлено уменьшение доли гидрофильных фракций в подстилке (49–50 %) и увеличение гидрофобных компонентов в основном за счёт фракций (третьей и четвёртой), образующихся в результате разложения растительных остатков (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин). Данная особен-

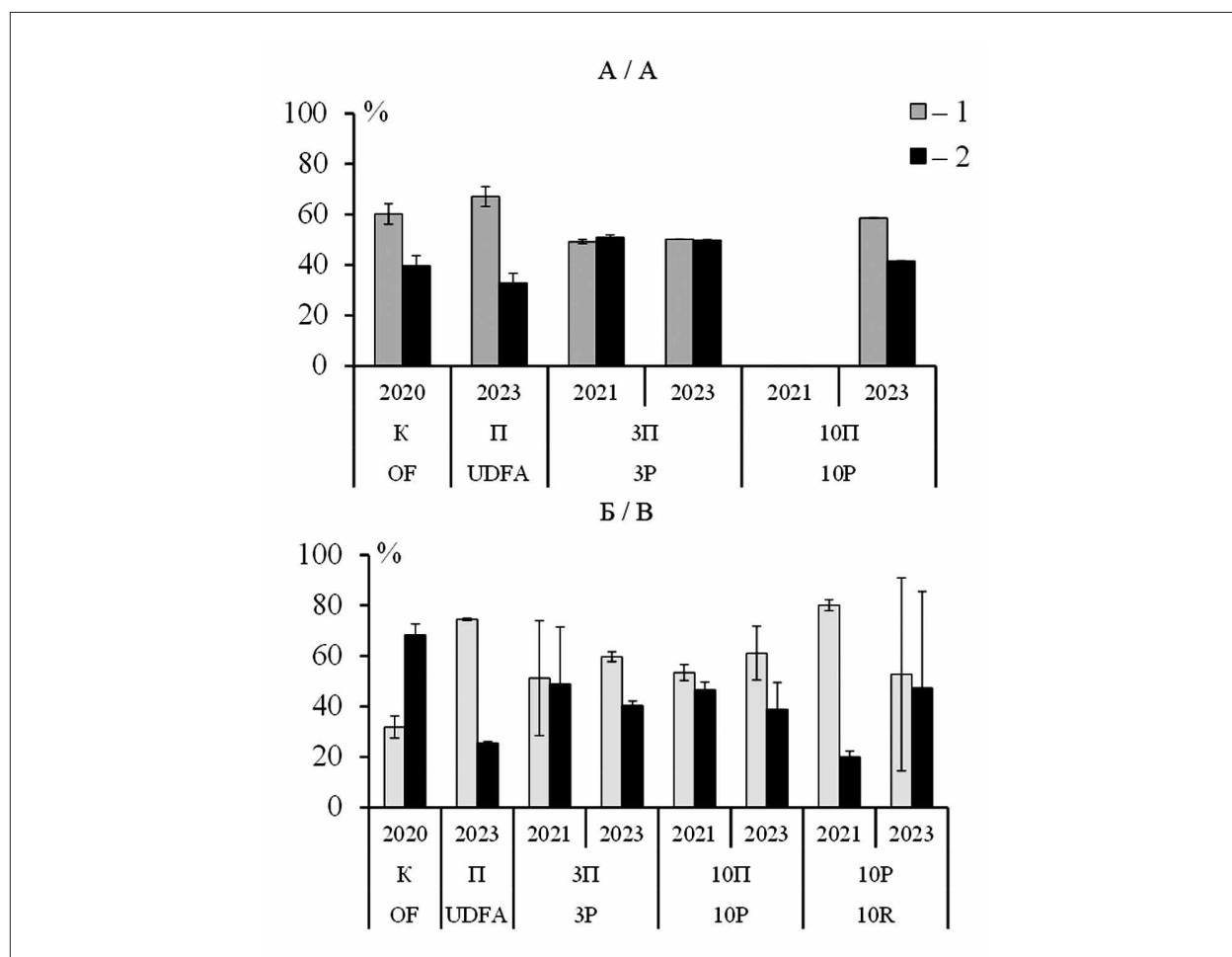


Рис. Содержание (%) амфифильных фракций в подстилках (А) и минеральных горизонтах (Б). 1 – гидрофильные фракции, 2 – гидрофобные фракции. Обозначения как в таблице 1
Fig. Content (%) of amphiphilic fractions in bedding (A) and mineral horizons (B). 1 – hydrophilic fractions, 2 – hydrophobic fractions. Designations as in Table 1

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты корреляции Пирсона (r) амфифильных фракций ПОВ с содержанием углерода и азота (по данным работ [14, 17]) / Pearson correlation coefficients (r) of amphiphilic fractions with carbon and nitrogen content (according to [14, 17])

| Параметр / Parameter | | $C_{\text{общ}} / C_{\text{tot}}$ | $N_{\text{общ}} / N_{\text{tot}}$ | $C_{\text{вс}} / TC$ | $N_{\text{вс}} / TN$ |
|---|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Номер хроматографической фракции Chromatographic fraction number | 1 | 0,18 | 0,17 | 0,22 | -0,32 |
| | 2 | -0,20 | -0,20 | -0,24 | -0,01 |
| | 3 | 0,69* | 0,66* | 0,45* | -0,26 |
| | 4 | 0,77* | 0,79* | 0,73* | -0,14 |
| | 5 | -0,70* | -0,68* | -0,57* | 0,41* |
| Степень гидрофильности Hydrophilicity degree | D_{H} | -0,21 | -0,21 | -0,18 | -0,25 |

Примечание: $C_{\text{общ}}$ – общий углерод почвы, $C_{\text{вс}}$ – водорастворимая фракция углерода, $N_{\text{общ}}$ – общий азот почвы, $N_{\text{вс}}$ – водорастворимая фракция азота. * – значимые величины, $p < 0,05$, $n = 27$.

Note: C_{tot} – total soil carbon, TC – water-soluble carbon fraction, N_{tot} – total soil nitrogen, TN – water-soluble nitrogen fraction. * – significant values, $p < 0.05$, $n = 27$.

ность обусловлена разложением порубочных остатков на волокнах, поскольку органическое вещество древесных остатков богато лигнином и лигниноподобными веществами [22]. Аналогичные закономерности для почвы с тремя проходами форвардера наблюдаются и спустя три года после рубки.

Для почв с десятью проходами колёсной техники характерны наибольшие изменения морфологических свойств верхней части почвенного профиля, обусловленные перемешиванием (турбированием) минеральных горизонтов с подстилкой. Для почвы 10Р также дополнительно было проведено разравнивание колеи, были убраны все порубочные остатки и подстилочный горизонт. Показано, что в первый год после рубки для почвы 10П в минеральных горизонтах содержание гидрофильных фракций составляло 53 %, что близко к показателям почвы 3П, но ниже, чем в исходном лесу. Также отмечено уменьшение целлюлозоподобных и лигнинсодержащих фракций ПОВ, в основном за счёт третьей фракции (6–18 %). Гидрофобные соединения, входящие в состав этих хроматографических фракций, преимущественно сосредоточены в подстилках, что связано с их малой подвижностью и аккумуляцией непосредственно в месте образования. На третий год после рубки наблюдается незначительное увеличение их содержания, что связано с поступлением свежего растительного опада. Спустя три года начинает формироваться органогенный горизонт O(L), в котором увеличивается доля третьей и четвёртой фракций до 39 %. В турбированном горизонте почвы 10П выявлено уменьшение доли фракции, связанной с железом и алюминием, спустя три года после рубки до 3,4–21 %, что значительно ниже, чем в почве ИЛ. Вероятно,

это связано с началом разложения и минерализации погребённой органики из подстилки и порубочных остатков, что приводит к увеличению фракций (третьей и четвёртой), приуроченных к продуктам гумификации органического материала *in situ* [8]. Увеличение доли гидрофобных соединений в почвах волоков может быть связано с переувлажнением почв на первых стадиях послерубочной сукцессии и с миграцией низкомолекулярных соединений, а также с увеличением содержания доступных для связывания ионов железа и алюминия. К третьему году после рубки наблюдается снижение доли 5-й фракции, что может быть вызвано активной миграцией гидрофобных соединений по почвенному профилю. На участках, подвергшихся механическому нарушению, наблюдается тенденция уменьшения содержания третьей фракции ПОВ, по сравнению с исходным лесом. Это в значительной степени определяется изменением качественного и количественного состава растительного опада в ходе послерубочного лесовозобновления, что является важной отличительной особенностью почв после рубки.

Анализ корреляционных связей (табл. 2) позволил установить, что гидрофобные фракции (3 и 4), представленные ароматическими и лигнинсодержащими соединениями, обладают высокой степенью корреляции с общим углеродом почвы $C_{\text{общ}}$ ($r = 0,69–0,77$, $p < 0,05$), общим азотом $N_{\text{общ}}$ ($r = 0,66–0,79$, $p < 0,05$) и водорастворимой фракцией углерода $C_{\text{вс}}$ ($r = 0,45–0,74$, $p < 0,05$). Напротив, пятая гидрофобная фракция, связанная с ионами металлов, имеет отрицательную корреляцию с содержанием углерода – $C_{\text{вс}}$ ($r = -0,57$, $p < 0,05$), общим $C_{\text{общ}}$ ($r = -0,57$, $p < 0,05$). Значимых корреляцион-

ных зависимостей для гидрофильных фракций не выявлено.

Показатель гидрофильности (D_H) также существенно различается для почв разных технологических элементов вырубки до и после рубки. Для почвы исходного леса показатель варьирует в диапазоне 0,4–1,8. В минеральных горизонтах D_H был равен 0,4–0,5, в подстилке – 1,3–1,8. Это соотносится с ранее полученными данными для почв региона исследований [21]. После рубки в почве пасечного участка выявлено увеличение показателя гидрофильности до 1,8–3,0, что свидетельствует о преобладании в составе органического вещества гидрофильных фракций. В почве с тремя проходами колёсной техники степень гидрофильности составляла 0,5–2,0 в минеральных горизонтах спустя год после рубки, в подстилке 0,9–1,0. Спустя три года после рубки для почвы ЗП показатель D_H оставался достаточно стабилен – 1,0–1,6. В подстилке почвы 10П на третий год после рубки степень гидрофильности была близка к показателю исходного участка (1,4). В целом для почвы с десятью проходами форвардера D_H варьировал от 1,1 до 1,4. Наибольшие изменения состава амфифильных фракций по степени гидрофильности выявлены для почвы с выравниваем 10Р. Выявлено значительное возрастание гидрофильных компонентов в составе ПОВ от 3,6–4,4 в первый год после рубки до 0,3–3,9 на третий. Также происходит увеличение доли пятой фракции в нижнем минеральном горизонте спустя три года после рубки. Это можно объяснить развитием процессов оглеения, в результате которых происходит накопление соединений железа и алюминия, способных к реакциям комплексообразования [23].

Таким образом, установлено, что компоненты растительности, порубочных остатков, древесного опада, являющиеся прекурсорами ПОВ, обуславливают различия гидрофильно-гидрофобных свойств почв [24–26]. Показано, что органическое вещество чутко реагирует на антропогенную нагрузку на уровне амфифильных фракций ПОВ, поскольку их содержание существенно различается от исходных показателей после сплошнолесосечной рубки.

Заключение

Проведённое исследование показало, что основную долю щёлочерастворимого органического вещества в почвах составляют гидро-

фильные фракции, отличающиеся высокой миграционной и реакционной способностью. Установлено, что их доля увеличивается в процессе лесовозобновления после рубки, как в подстилках, так и минеральных горизонтах почв, что отчётливо прослеживается по показателю степени гидрофильности. Кроме этого происходит накопление гидрофобных лигнинсодержащих фракций, образующихся в результате разложения растительных остатков, в почвах волоков вследствие механического перемешивания верхних минеральных горизонтов с подстилкой после прохождения тяжёлой колёсной техникой. Вероятно, амфифильные компоненты ПОВ можно использовать для мониторинга антропогенных изменений почв в результате сплошнолесосечных рубок.

Работа выполнена в рамках ГБ темы «Почвы и почвенные ресурсы европейского Северо-Востока России в условиях современных климатических изменений, антропогенного пресса и социально-экономических вызовов» (№ 125021902454-1).

Авторы выражают благодарность Броваровой Д.А. за помощь в проведении химического анализа.

Литература

1. Крышень А.М. Растительные сообщества вырубок Карелии. М.: Наука, 2006. 262 с.
2. Лукина Н.В., Полянская Л.М., Орлова М.А. Питательный режим почв северотаежных лесов. М.: Наука, 2008. 341 с.
3. Дымов А.А. Влияние сплошных рубок в бореальных лесах России на почвы (обзор) // Почвоведение. 2017. № 7. С. 787–798. doi: 10.7868/S0032180X17070024
4. Долгая В.А., Бахмет О.Н. Свойства лесных подстилок на ранних этапах естественного лесовозобновления после сплошных рубок в средней тайге Карелии // Лесоведение. 2021. № 1. С. 65–77. doi: 10.31857/S0024114821010022
5. Карпачевский Л.О. Динамика свойств почвы. М.: ГЕОС, 1997. 170 с.
6. Kuuluvainen T., Gauthier S. Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change // For. Ecosyst. 2018. V. 5. Article No. 26. doi: 10.1186/s40663-018-0142-2
7. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. М.: ГЕОС, 2020. 336 с. doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828
8. Милановский Е.Ю. Гумусовые вещества почв как природные гидрофобно-гидрофильные соединения. М.: ГЕОС, 2009. 185 с.

9. Умарова А.Б. Преимущественные потоки влаги в почвах: закономерности формирования и значение в функционировании почв. М.: ГЕОС, 2011. 265 с.
10. Дымов А.А., Милановский Е.Ю. Изменение органического вещества таежных почв в процессе естественного лесовозобновления растительности после рубок (средняя тайга Республики Коми) // Почвоведение. 2014. № 1. С. 39–47. doi: 10.7868/S0032180X14010043
11. Старцев В.В., Дымов А.А. Амфифильные свойства и водорастворимые компоненты органического вещества почв Приполярного Урала // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1492–1505. doi: 10.31857/S0032180X21120121
12. Чупрова В.В., Люкшина И.В., Белоусов А.А., Швабенланд И.С. Запасы и динамика легкоминерализуемой фракции органического вещества в почвах Средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2003. Вып. 3. С. 65–74.
13. Власенко О.А. Динамика углерода подвижного гумуса в агрочерноземе при возделывании яровой пшеницы с помощью ресурсосберегающих технологий // Вестник КрасГАУ. 2015. № 9. С. 60–66.
14. Дымов А.А., Старцев В.В., Горбач Н.М., Севергина Д.А., Кутявин И.Н., Осипов А.Ф., Дубровский Ю.А. Изменения почв и растительности при разном числе проездов колесной лесозаготовительной техники (средняя тайга, Республика Коми) // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1426–1441. doi: 10.31857/S0032180X22110028
15. Богатырев Л.Г. Образование подстилок – один из важнейших процессов в лесных экосистемах // Почвоведение. 1996. № 4. С. 501–511.
16. Богатырев Л.Г., Демин В.В., Матышак Г.В., Сапожникова В.А. О некоторых теоретических аспектах исследования лесных подстилок // Лесоведение. 2004. № 4. С. 17–29.
17. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // Eurasian Soil Sc. 2024. V. 57. No. 6. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064
18. Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical properties upper mineral soil horizons in a cutover area of the middle boreal forest in the Komi Republic // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2024. V. 79. No. 2. P. 91–100. doi: 10.3103/S0147687424700108
19. Osipov A.F., Startsev V.V., Dymov A.A. Influence of clear felling on CO₂ emission from surface of podzolic soil of coniferous–deciduous forest (Middle Taiga, Komi Republic) // Eurasian Soil Sc. 2024. V. 57. No. 5. P. 806–813. doi: 10.1134/S1064229323603700
20. Кутявин И.Н., Манов А.В., Старцев В.В., Дымов А.А. Влияние лесозаготовительной техники на динамику естественного возобновления леса после рубки хвойно-лиственного насаждения средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 3. С. 123–132. doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132
21. Дымов А.А., Низовцев Н.А. Амфифильные свойства почвенного органического вещества преобладающих хвойных деревьев средней тайги // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 62–68. doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-061-068
22. Карманов А.П., Кочева Л.С. Целлюлоза и лигнин – свойства и применение. Сыктывкар: Коми науч. центр УрО Российской АН, 2006. 246 с.
23. Зайдельман Ф.Р. Процесс глееобразования и его роль в формировании почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. 316 с.
24. Kovaleva N.O., Kovalev I.V. Transformation of lignin in surface and buried soils of mountainous landscapes // Eurasian Soil Sc. 2009. V. 42. No. 11. P. 1270–1281. doi: 10.1134/S1064229309110106
25. Ведрова Э.Ф., Решетникова Т.В. Масса подстилки и интенсивность её разложения в 40-летних культурах основных лесобразующих пород Сибири // Лесоведение. 2014. № 1. С. 42–50.
26. Vesterdal L., Schmidt I.K., Callesen I., Nilsson L.O., Gundersen P. Carbon and nitrogen floor and mineral soil under six common European tree species // Forest Ecology and Management. 2008. V. 255. P. 35–48. doi: 10.1016/j.foreco.2007.08.015

References

1. Kryshen A.M. Plant communities of clearcuts in Karelia. Moscow: Nauka, 2006. 262 p. (in Russian).
2. Lukina N.V., Polyanskaya L.M., Orlova M.A. Nutrient regime of soils of northern taiga forests. Moskva: Nauka, 2008. 341 p. (in Russian).
3. 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
4. Dolgaya V.A., Bakhmet O.N. Forest litter layer properties on the early stages of natural regrowth after clear cuts in Karelian middle taiga // Lesovedenie. 2021. No. 1. P. 65–77 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114821010022
5. Karpachevsky L.O. Dynamics of soil properties. Moskva: GEOS, 1997. 170 p. (in Russian).
6. Kuuluvainen T., Gauthier S. Young and old forest in the boreal: critical stages of ecosystem dynamics and management under global change // For. Ecosyst. 2018. V. 5. Article No. 26. doi: 10.1186/s40663-018-0142-2
7. Dymov A.A. Soil successions at boreal forests of the Komi Republic. Moskva: GEOS, 2020. 336 p. (in Russian). doi: 10.34756/GEOS.2020.10.37828
8. Milanovsky E.Yu. Humic substances of soils as natural hydrophobic-hydrophilic compounds. Moskva: GEOS, 2009. 185 p. (in Russian).
9. Umarova A.B. Predominant moisture flows in soils: regularities of formation and importance in soil functioning. Moskva: GEOS, 2011. 265 p. (in Russian).
10. Dymov A.A., Milanovsky E.Yu. Changes in organic matter of taiga soils in the process of natural reforestation of

vegetation after logging (middle taiga of the Komi Republic) // *Pochvovedenie*. 2014. No. 1. P. 39–47 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X14010043

11. Startsev V.V., Dymov A.A. Amphiphilic properties and water-soluble organic matter of the soils of the Subpolar Urals // *Pochvovedenie*. 2021. No. 12. P. 1492–1505 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21120121

12. Chuprova V.V., Lukshina I.V., Belousov A.A., Shvabenland I.S. Stocks and dynamics of easily mineralizable fraction of organic matter in the soils of Central Siberia // *Vestn. KrasGAU*. 2003. No. 3. P. 65–74 (in Russian).

13. Vlasenko O.A. The dynamics of mobile humus carbon in agrochernozem in the spring wheat cultivation with the use of resource-saving technologies // *Vestn. KrasGAU*. 2015. No. 9. P. 60–66 (in Russian).

14. Dymov A.A., Startsev V.V., Gorbach N.M., Severgina D.A., Kutuyavin I.N., Osipov A.F., Dubrovsky Y.A. Changes in soil and vegetation with different number of passes of wheeled forestry equipment (Middle Taiga, Komi Republic) // *Pochvovedenie*. 2022. No. 11. P. 1426–1441 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22110028

15. Bogatyrev L.G. Formation of forest litter as one of the major processes in forest ecosystems // *Pochvovedenie*. 1996. No. 4. P. 501–511 (in Russian).

16. Bogatyrev L.G., Demin V.V., Matyshak G.V., Sapozhnikova V.A. On some theoretical aspects of studying forest litters // *Lesovedeniye*. 2004. No. 4. P. 17–29 (in Russian).

17. Startsev V.V., Severgina D.A., Dymov A.A. Dynamics of water-soluble carbon and nitrogen content in soils in the first years after clearcutting // *Eurasian Soil Sc.* 2024. V. 57. No. 6. P. 903–916. doi: 10.1134/S1064229324600064

18. Ogorodniaia S.A., Butylkina M.A., Krasikov S.R., Dymov A.A. Physical properties of upper mineral soil horizons in a cutover area of the middle boreal forest in

the Komi Republic // *Moscow Univ. Soil Sci. Bull.* 2024. V. 79. No. 2. P. 91–100. doi: 10.3103/S0147687424700108

19. Osipov A.F., Startsev V.V., Dymov A.A. Influence of clear felling on CO₂ emission from surface of podzolic soil of coniferous–deciduous forest (Middle Taiga, Komi Republic) // *Eurasian Soil Sc.* 2024. V. 57. No. 5. P. 806–813. doi: 10.1134/S1064229323603700

20. Kutuyavin I.N., Manov A.V., Startsev V.V., Dymov A.A. The logging equipment effect on the dynamics of natural reforestation of after cutting mixed coniferous-deciduous stand in the middle taiga // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 123–132 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-123-132

21. Dymov A.A., Nizovtsev N.A. Amphiphilic properties of soil organic matter of predominant coniferous trees of the middle taiga // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 1. P. 62–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-1-061-068

22. Karmanov A.P., Kocheva L.S. Cellulose and lignin – properties and application. Syktyvkar: Komi nauch. tsentr UrO Rossiyskoy AN, 2006. 246 p. (in Russian).

23. Zaidelman F.R. Gleyzation and its role in soil formation. Moskva: Moscow University Press, 1998. 316 p. (in Russian).

24. Kovaleva N.O., Kovalev I.V. Transformation of lignin in surface and buried soils of mountainous landscapes // *Eurasian Soil Sc.* 2009. V. 42. No. 11. P. 1270–1281. doi: 10.1134/S1064229309110106

25. Vedrova E.F., Reshetnikova T.V. Litter mass and intensity of litter decomposition in 40-year old plantations of the main forest forming species of Siberia // *Lesovedenie*. 2014. No. 1. P. 42–50 (in Russian).

26. Vesterdal L., Schmidt I.K., Callesen I., Nilsson L.O., Gundersen P. Carbon and nitrogen floor and mineral soil under six common European tree species // *Forest Ecology and Management*. 2008. V. 255. P. 35–48. doi: 10.1016/j.foreco.2007.08.015

Ингибирующий эффект иодмоноформазана в восстановлении иоднитротетразолия хлорида суспензией бактерии *Bacillus stearothermophilus* в физиологическом растворе

© 2026. А. А. Калинина, к. х. н., зав. кафедрой,

Т. Н. Соколова, д. х. н., профессор, П. С. Афанасьева, аспирант, м. н. с.,

А. О. Кувшинова, студент, техник, Т. М. Балуева, студент, техник,

А. Д. Тубакина, студент, техник,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,

603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. К. Минина, д. 24,

e-mail: 777aleksa777_87@mail.ru

Изучена скорость восстановления иоднитротетразолия хлорида бактерией *Bacillus stearothermophilus* в физиологическом растворе при температуре 37 °С, оптимальной для жизнедеятельности микроорганизмов. Выявлено, что скорость реакции замедляется при достижении конверсии реагента 60–70 %. Выдвинуто предположение об ингибирующей роли в восстановлении соли тетразолия продукта реакции иодмоноформазана. На основании экспериментальных данных зависимости текущей концентрации иодмоноформазана от времени экспозиции предложена формально-кинетическая схема реакции восстановления иодмоноформазана клеточными донорами электронов. В соответствии со схемой продукт реакции взаимодействует с клеточными редокс-центрами с образованием неактивных комплексов с константами ингибирования K_i . Диаграммным методом получено интегральное кинетическое уравнение, которое согласуется с экспериментальными данными. Определено численное значение константы ингибирования продуктом, равное $(1,42 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}$ М.

Ключевые слова: иоднитротетразолия хлорид, *Bacillus stearothermophilus*, кинетическая схема ингибирования продуктом реакции, константа ингибирования.

Iodmonoformazan inhibits iodonitrotetrazolium chloride reduction by *Bacillus stearothermophilus* suspension in a saline solution

© 2026. А. А. Kalinina ORCID: 0000-0002-1551-5790, Т. Н. Sokolova ORCID: 0000-0002-5975-2608,

Р. S. Afanasieva ORCID: 0000-0002-3994-6907, А. О. Kuvshinova ORCID: 0000-0001-9322-1221,

Т. М. Balueva ORCID: 0009-0000-7195-7094, А. D. Tubakina ORCID: 0000-0001-9219-0769,

Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev,

24, Minin St., Nizhny Novgorod, Russia, 603950,

e-mail: 777aleksa777_87@mail.ru

Tetrazolium salts are used in monitoring the ecological state of environmental objects, especially after exposure to factors unfavorable to organisms: forest fires, oil spills, industrial and household pollution. The possibility of identifying the indicator properties of iodonitrotetrazolium chloride (INT) to assess the viability of the aerobic bacterium *Bacillus stearothermophilus* is shown. The dependence of the concentration of the iodomonoformazan (IMF) reduction product on the exposure time at an optimal for the vital microorganisms' activity temperature of 37 °C was studied as a criterion for quantifying the bacterium reducing ability in relation to a tetrazolium salt. The IMF concentration was determined spectrophotometrically at 490 nm wavelength after extraction of an aliquot of the reaction mixture with ethyl acetate. It was found that the reaction rate slows down when the reagent conversion reaches 60–70 %. It has been suggested that a decrease in the regenerative capacity of bacterial cells may be due to the IMF recovery product inhibitory effect. Formazan is less polar than INT, and has a greater affinity for cellular components. This argument suggests that IMF forms inactive complexes with cellular reducing agents. The blocking of cellular redox centers by the reduction product may be the main reason for the decrease in reagent conversion over time. A formal kinetic scheme of the IMF reduction reaction by cellular electron donors is proposed based on experimental data on the dependence of the IMF current concentration on the exposure time. According to the scheme, the reaction product does not selectively interact with cellular redox centers to form inactive complexes with an inhibition constant K_i . The scheme is processed by the diagram method based

on the quasi-equilibrium approximation of kinetic scheme analysis. The integral kinetic equation in Walker-Schmidt coordinates, which are widely used in enzymatic catalysis, is obtained by the diagram method. The kinetic equation obtained is consistent with the experimental data. The numerical value of the inhibition constant by the product equal to $(1.42 \pm 0.12) \cdot 10^{-5}$ M was determined.

Keywords: iodonitrotetrazolium chloride, *Bacillus stearothermophilus*, kinetic scheme of inhibition by the reaction product, diagram method, inhibition constant.

Одно из главных химических свойств солей тетразолия – способность к мягкому восстановлению с раскрытием тетразолиевого цикла и образованием нейтральных интенсивно окрашенных (от вишнёво-красных до пурпурно-чёрных) соединений – формазанов [1, 2].

Впервые возможность использования солей тетразолия в качестве неселективных индикаторов дыхательной активности бактерий и в целом их жизнеспособности была доказана в работе [3]. С тех пор способность солей тетразолия к восстановлению клеточными ферментами микроорганизмов стала широко использоваться в мониторинге экологического состояния объектов окружающей среды, особенно после воздействия на неё неблагоприятных для живых организмов факторов: лесных пожаров, нефтяных разливов, промышленных и бытовых загрязнений и др. [4–7]. Тетразолиевый метод индикации позволяет относительно быстро получить информацию об уровне и типе нарушений природной среды естественными и техногенными физическими, химическими и биологическими факторами. Однако тест-системы на основе солей тетразолия не всегда объективны вследствие реализации в микробиологических сообществах разных межмикробных взаимодействий (конкуренция, антагонизм, мутуализм, комменсализм, кометаболизм субстратов и т. п.). Более того, некоторые жизнеспособные клетки не дают отклика на индикаторную соль тетразолия [8–10].

Для выявления биогенных факторов, определяющих способность бактерий *Bacillus subtilis*, *Bacillus stearothermophilus*, *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli* восстанавливать соль тетразолия, был использован кинетический метод [11–13]. Установлено, что скорость восстановления иоднитротетразолия хлорида (ИНТ) ($R_1 = C_6H_4I$, $R_2 = C_6H_4NO_2$; $R_3 = C_6H_5$) суспензией бактерий в физиологическом растворе описывается кинетическим уравнением реакции псевдопервого порядка. При этом эффективные константы скорости восстановления ИНТ суспензией грамположительных палочковидных бактерий в 8–10

раз превышают соответствующие величины при воздействии на ИНТ грамотрицательных бактерий. Был сделан вывод о роли строения клеточной стенки в скорости восстановления соли тетразолия [13]. В этой же работе было показано, что кинетическая кривая накопления йодмоноформаза (ИМФ) имеет монотонно возрастающий характер, переходящий в плато при конверсии реагента от 55 до 85 %. Было высказано предположение, что на конверсию реагента оказывает влияние продукт восстановления – ИМФ.

Особенно влияние продукта проявилось при использовании суспензии бактерии *B. stearothermophilus* [13]. Причём при начальной концентрации ИНТ, равной $5,88 \cdot 10^{-5}$ М, реакция протекала до конверсии реагента около 98 %, а скорость восстановления удовлетворительно описывалась кинетическим уравнением реакции псевдопервого порядка. При увеличении исходной концентрации ИНТ до $20 \cdot 10^{-5}$ М, его восстановление прекращалось примерно через 1 ч экспозиции при конверсии всего 27 %.

Предположение об ингибирующем влиянии формазана на восстановление ИНТ дополнительных подтверждений в работах [11–13] не получило.

Цель настоящей работы – выявление кинетическими методами возможности ИМФ оказывать ингибирующий эффект на восстановление ИНТ суспензией бактерии *Bacillus stearothermophilus* в физиологическом растворе.

Объекты и методы исследования

Выбор биологического объекта обусловлен имеющимися кинетическими результатами, представленными в работе [13], выявленной низкой конверсией реагента при исходной концентрации ИНТ более $8 \cdot 10^{-5}$ М, а также воспроизводимостью и согласованностью полученных данных при решении поставленной задачи с результатами работы.

В качестве тест-организмов использовались бактерии *Bacillus stearothermophilus* (предоставлены Всероссийской коллекци-

ей микроорганизмов, ФИЦ ПНЦБИ РАН, г. Пущино Московской обл.).

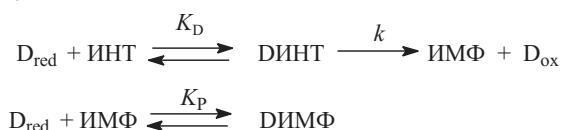
Методика кинетического эксперимента описана в работах [11–13]. Смыв суточной бактериальной культуры со скошенного мясопептонного агара (МПА) физиологическим раствором (0,9 % водный раствор хлорида натрия) доводили до оптической плотности $1,00 \pm 0,05$ (670 нм). К 12 мл бактериальной суспензии в стерильных условиях добавляли аликвоту 1,0 мМ водного раствора соли ИНТ в соответствии с начальной концентрацией, и смесь выдерживали в термостате при температуре 37 °С. Через временные интервалы, равные 5–20 мин в зависимости от глубины протекания реакции, 5 мл анализируемой смеси отбирали в пробирку с *B. stearothermophilus*. Далее смесь экстрагировали этилацетатом, сушили хлоридом кальция, после фильтрации анализировали спектрофотометрически при длине волны 490 нм, характерной для продукта восстановления – иодмоноформаза. Коэффициент экстинкции определяли по калибровочному графику. Его величина, равная $1,9 \cdot 10^4$ л/(моль · см), согласуется с литературными данными [2].

Текущие концентрации продукта восстановления ИНТ иодмоноформаза (ИМФ) определяли по результатам 5–6 независимых экспериментов, среднеквадратичная ошибка определения составила 10–15 %.

Спектры регистрировали на спектрофотометре «2802 UV/VisUnico» (United Products & Instruments, Inc, США). Исследования с применением культуры бактерий проводили в термостате марки «ТС-1/80 СПУ» (Смоленское СКТБ СПУ, Россия). В работе использовали следующие реактивы: йоднитротетразолия хлорид (95 %, Aldrich), иодмоноформазан (crystalline, Sigma), этилацетат (ч.д.а.) в виде коммерческих препаратов.

Результаты и обсуждение

Для объяснения влияния продукта на скорость восстановления ИНТ была предложена следующая кинетическая схема:

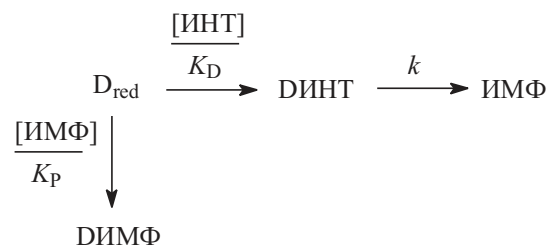


где D_{red} и D_{ox} – восстановленная и окисленная форма клеточного восстановителя, K_D – константа диссоциации промежуточного комплекса клеточного восстановителя и соли

тетразолия ИНТ (ДИНТ), K_P – константа ингибирования продуктом, обратно пропорциональная константе образования комплекса клеточного восстановителя и продукта восстановления ИМФ (ДИМФ), k – константа скорости продуктообразующей стадии.

В соответствии со схемой соль тетразолия образует комплекс с редокс-центром клеточного восстановителя, который впоследствии превращается в продукт. Нейтральный иодмоноформазан, обладая высоким сродством к восстановителю, блокирует редокс-центры, образуя неактивный комплекс ДИМФ.

Дифференциальную форму кинетического уравнения скорости восстановления ИНТ клеточным донором электронов находим диаграммным методом:



где состояния клеточного восстановителя – вершины, а линии, соединяющие вершины – дуги с определёнными численными значениями.

В соответствии со схемой:

$$V = -\frac{d[\text{ИНТ}]}{dt} = \frac{k[D_{\text{red}}][\text{ИНТ}]}{1 + \frac{[\text{ИНТ}]}{K_D} + \frac{[\text{ИМФ}]}{K_P}}$$

В условиях эксперимента (физиологический раствор, т. е. отсутствие внешнего источника питания) можно предположить, что клеточная концентрация восстановителя постоянна вследствие процессов саморегуляции содержания ключевых метаболитов в течение непродолжительного времени сохранения концентрации жизнеспособных клеток.

Поэтому можно ввести обозначение:

$$k_{\text{эф.}} = k[D_{\text{red}}]. \quad (1)$$

Используя обозначение (1) и выражая концентрацию продукта через текущую концентрацию реагента

$$[\text{ИМФ}] = [\text{ИНТ}]_0 - [\text{ИНТ}], \quad (2)$$

имеем:

Таблица 1 / Table 1

Кинетические параметры восстановления ИНТ суспензией бактерии *Bacillus stearothermophilus* (37 °C) / Kinetic parameters of INT reduction by *Bacillus stearothermophilus* suspension (37 °C)

| [ИНТ] ₀ = 8,82 · 10 ⁻⁵ , М [INT] ₀ = 8,82 · 10 ⁻⁵ , М | | [ИНТ] ₀ = 10,30 · 10 ⁻⁵ , М [INT] ₀ = 10,30 · 10 ⁻⁵ , М | | [ИНТ] ₀ = 20,40 · 10 ⁻⁵ , М [INT] ₀ = 20,40 · 10 ⁻⁵ , М | |
|--|--------------|--|--------------|--|--------------|
| [ИМФ] · 10 ⁵ , М [IMF] · 10 ⁵ , М | t, с t, s | [ИМФ] · 10 ⁵ , М [IMF] · 10 ⁵ , М | t, с t, s | [ИМФ] · 10 ⁵ , М [IMF] · 10 ⁵ , М | t, с t, s |
| 0,93 | 600 | 2,54 | 602 | 2,28 | 600 |
| 1,72 | 1200 | 2,92 | 900 | 3,67 | 1200 |
| 1,94 | 1801 | 3,83 | 1800 | 4,55 | 1800 |
| 2,36 | 2400 | 4,03 | 2400 | 5,26 | 3000 |
| 2,39 | 3000 | 4,07 | 3600 | 5,36 | 3600 |
| 2,53 | 3600 | 4,43 | 5400 | 5,68 | 4202 |
| 2,65 | 4201 | 4,54 | 7200 | – | – |
| – | – | 4,59 | 8400 | – | – |

Примечание: ИНТ – иоднитротетразолия хлорид, ИМФ – иодмоноформазан. Прочерк означает, что исследования при данной концентрации не проводились, поскольку кинетические кривые выходили на плато.

Note: INT – iodinitrotetrazolium chloride, IMF – iodomonoformazane. A dash means that studies with this concentration were not conducted because the kinetic curves reached a plateau.

$$V = -\frac{d[\text{ИНТ}]}{dt} = \frac{k_{\text{эф.}} \frac{[\text{ИНТ}]}{K_D}}{1 + \frac{[\text{ИНТ}]}{K_D} + \frac{[\text{ИНТ}]_0}{K_P} - \frac{[\text{ИНТ}]}{K_P}}$$

После умножения числителя и знаменателя полученного выражения на $K_D K_P$ получаем:

$$-\frac{d[\text{ИНТ}]}{dt} = \frac{k_{\text{эф.}} K_P [\text{ИНТ}]}{K_D K_P + K_P [\text{ИНТ}] + K_D [\text{ИНТ}]_0 - K_D [\text{ИНТ}]} \quad (3)$$

После деления числителя и знаменателя выражения (3) на $K_P [\text{ИНТ}]$ имеем:

$$-\frac{d[\text{ИНТ}]}{dt} = \frac{k_{\text{эф.}}}{\frac{K_D}{[\text{ИНТ}]} + 1 + \frac{K_D [\text{ИНТ}]_0}{K_P [\text{ИНТ}]} - \frac{K_D}{K_P}}$$

или

$$-\frac{d[\text{ИНТ}]}{dt} = \frac{k_{\text{эф.}}}{\left(1 - \frac{K_D}{K_P}\right) + K_D \left(1 + \frac{[\text{ИНТ}]_0}{K_P}\right) \frac{1}{[\text{ИНТ}]}}$$

После разделения переменных

$$\left(1 - \frac{K_D}{K_P}\right) d[\text{ИНТ}] + K_D \left(1 + \frac{[\text{ИНТ}]_0}{K_P}\right) \frac{d[\text{ИНТ}]}{[\text{ИНТ}]} = -k_{\text{эф.}} dt \quad (4)$$

и интегрирования выражения (4) получаем:

С учётом обозначения (2)

$$\left(1 - \frac{K_D}{K_P}\right) [\text{ИМФ}] + K_D \left(1 + \frac{[\text{ИНТ}]_0}{K_P}\right) \ln \frac{[\text{ИНТ}]_0}{[\text{ИНТ}]_0 - [\text{ИМФ}]} = k_{\text{эф.}} t.$$

Полученное уравнение преобразуем в линейную зависимость в координатах

$$\frac{[\text{ИМФ}]}{t} = f \left(\frac{1}{t} \ln \frac{[\text{ИНТ}]_0}{[\text{ИНТ}]_0 - [\text{ИМФ}]} \right) :$$

$$\frac{[\text{ИМФ}]}{t} = \frac{k_{\text{эф.}}}{\left(1 - \frac{K_D}{K_P}\right) - \frac{K_D \left(1 + \frac{[\text{ИНТ}]_0}{K_P}\right)}{\left(1 - \frac{K_D}{K_P}\right)} \frac{1}{t} \ln \frac{[\text{ИНТ}]_0}{[\text{ИНТ}]_0 - [\text{ИМФ}]} \quad (5)$$

Кинетические данные, необходимые для построения линейной зависимости (5), представлены в таблице 1.

Как видно из рисунка 1, линейная зависимость (5) выполняется удовлетворительно.

Следует обратить внимание, что по оси ординат зависимостей, представленных на рисунке 1, отсекается отрезок, имеющий отрицательное значение. Отрицательное значение эффективной скорости ($[\text{ИМФ}]/t$) реакции свидетельствует о значительном ингибировании продуктом реакции, причём $K_P < K_D$.

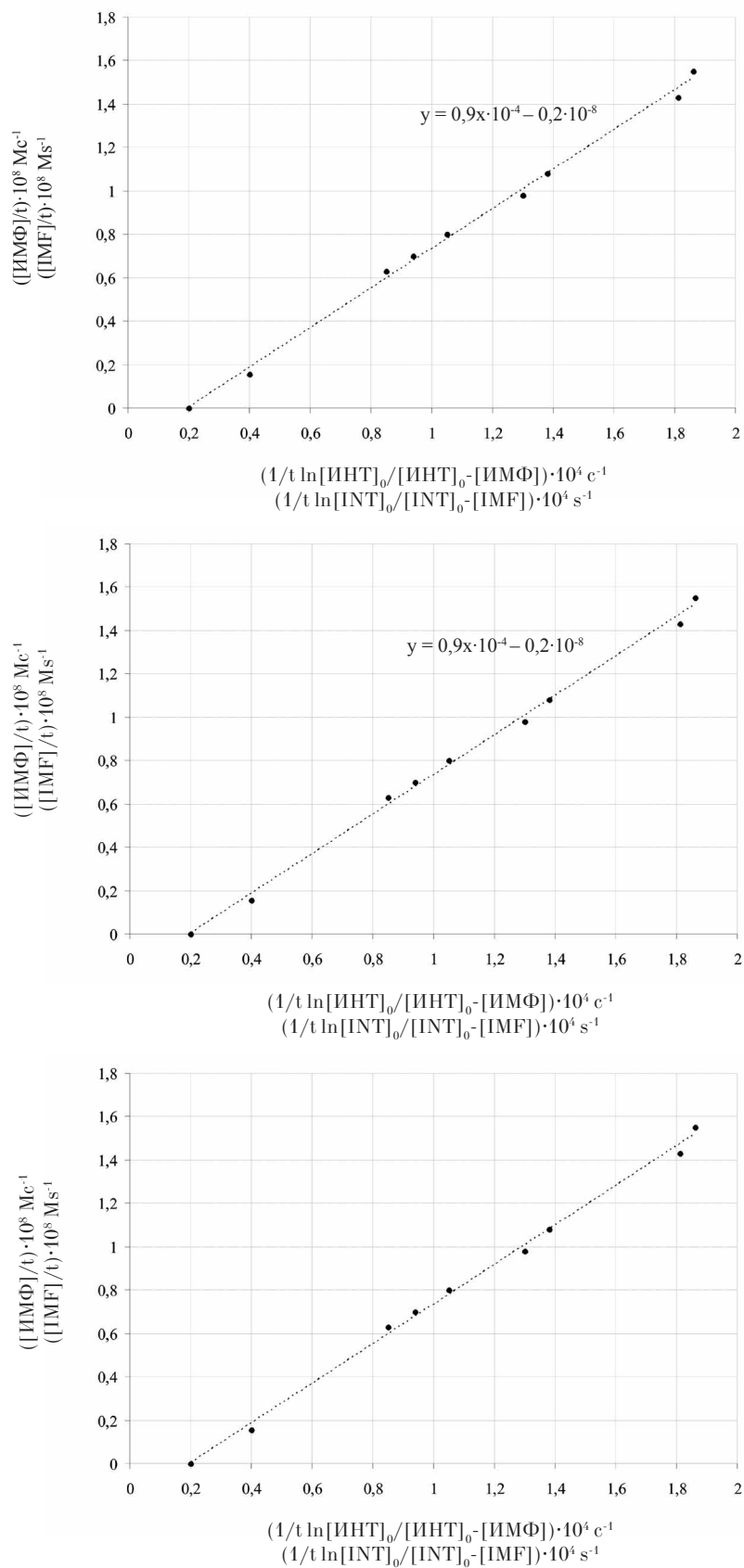


Рис. 1. Ингибирующее влияние продукта на скорость восстановления ИНТ (37 °С) суспензией бактерии *Bacillus stearothermophilus* при начальной концентрации ИНТ: а) $8,82 \cdot 10^{-5}$ М, б) $10,30 \cdot 10^{-5}$ М, в) $20,40 \cdot 10^{-5}$ М / **Fig. 1.** Product inhibitory effect on the INT reduction rate (37 °C) by *Bacillus stearothermophilus* suspension with $8.82 \cdot 10^{-5}$ M (a), $10.30 \cdot 10^{-5}$ M (b), and $20.40 \cdot 10^{-5}$ M (c) INT initial concentration

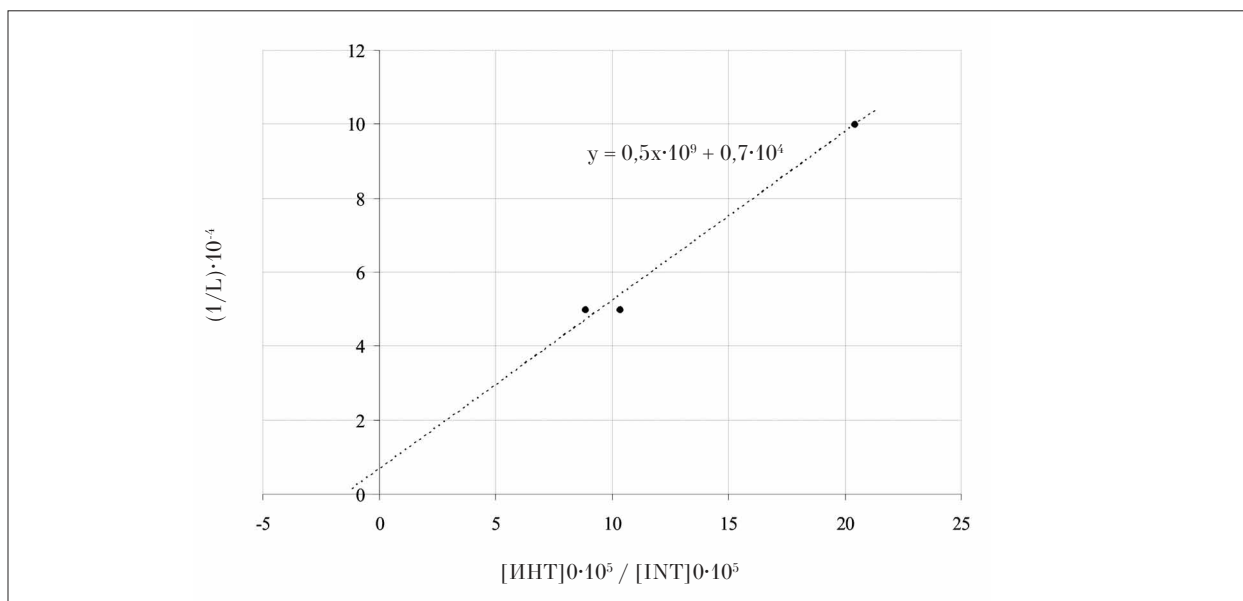


Рис. 2. Определение константы ингибирования продуктом реакции восстановления ИНТ суспензией бактерии *Bacillus stearotherophilus* в физиологическом растворе
Fig. 2. Determination of the inhibition constant by the product of the INT reduction reaction by *Bacillus stearotherophilus* suspension in a saline solution

Отрезок, отсекаемый по оси абсцисс, равен

$$L = \frac{k_{\text{эф.}}}{\left(1 + \frac{[\text{ИНТ}]_0}{K_p}\right)} \quad (6)$$

Разделив единицу на левую и правую части выражения (6), получаем уравнение прямой линии в координатах $1/L = f([\text{ИНТ}]_0)$, которое удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (рис. 2):

$$\frac{1}{L} = \frac{K_D}{k_{\text{эф.}}} + \frac{K_D}{k_{\text{эф.}} K_p} [\text{ИНТ}]_0 \quad (7)$$

Как следует из графических зависимостей, представленных в качестве примера на рисунках 1 и 2, действительно, ИМФ оказывает ингибирующее действие на восстановление ИНТ суспензией бактерии *B. stearotherophilus* с константой ингибирования, равной $1,40 \cdot 10^{-5}$ М (рис. 2).

Среднее значение K_p , определённое по результатам пяти экспериментальных серий, равно $(1,42 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}$ М.

Заключение

Установлено, что при высоких концентрациях ИНТ (более $8,0 \cdot 10^{-5}$ М, восстановление соли тетразолия суспензированными в физиологическом растворе клетками *B. stearotherophilus* ингибируется иодмоно-

формазаном. Предложена кинетическая схема ингибирования реакции продуктом. Интегральным методом получено кинетическое уравнение ингибирования продуктом, которое представляет собой линейную зависимость в координатах $\frac{[\text{ИМФ}]}{t} = f\left(\frac{1}{t} \ln \frac{[\text{ИНТ}]_0}{[\text{ИНТ}]_0 - [\text{ИМФ}]}\right)$.

Найдено численное значение константы ингибирования продуктом, равное $(1,42 \pm 0,12) \cdot 10^{-5}$ М.

Полученные результаты могут быть использованы в экологических исследованиях для оценки уровня биохимической активности в водных и почвенных объектах, а также для разработки биосенсоров и методов контроля экологического загрязнения. Факторы влияния клеточной стенки бактерий, а также процессов метаболизма на скорость восстановления необходимо учитывать при проведении экологического исследования методом визуализации отклика бактерий на соли тетразолия. Изменение цвета соли тетразолия в начальный момент времени исследования может привести к неправильному выводу об отсутствии в исследуемом объекте жизнеспособных грамотрицательных бактерий, поскольку их отклик на ИНТ существенно медленнее, чем грамположительных бактерий. Также выявленный ингибирующий эффект продукта восстановления – моноформаза, может быть использован при разработке препаратов с бактерицидным действием.

Литература

1. Altman F.P. Tetrazolium salts and formazans // Prog. Histochem. Cytochem. 1976. V. 9. No. 3. P. 1–56. doi: 10.1016/s0079-6336(76)80015-0

2. Seidler E. The tetrazolium-formazan system: design and histochemistry // Prog. Histochem. Cytochem. 1992. V. 24. No. 1. P. 1–86. doi: 10.1016/S0079-6336(11)80060-4

3. Kuhn R., Jerchel D. Über Invertseifen, VIII. Reduktion von tetrazoliumsalzen durch bakterier, gärende hefe und keimende samen // Ber. Deutsch. Chem. Ges. 1941. V. 74. No. 6. P. 949–952. doi: 10.1002/cber.19410740615

4. Isa H.W.M., Johari W.L.W., Syahir A., Abd Shukor M.Y., Nor Azwady A.A., Shaharuddin N.A., Muskhazli M. Development of a bacterial-based tetrazolium dye (MTT) assay for monitoring of heavy metals // Int. J. Agric. Biol. 2014. V. 16. No. 6. P. 1123–1128. doi: 13-317/2014/16-5-1123-1128

5. Плакунов В.К., Мартыанов С.В., Тетенева Н.А., Журнина М.В. Универсальный метод количественной характеристики роста и метаболической активности микробных биоплёнок в статических моделях // Микробиология. 2016. Т. 85. № 4. С. 484–489 doi: 10.7868/S0026365616040157

6. Testolin R.C., Almeida T.C.M., Polette M., Branco J.O., Fischer L.L., Niero G., Poyer-Radetski G., Silva V.C., Somenzi C.A., Corrêa A.X.R., Corrêa R., Rörig L.R., Itokazu A.G., Féraud J.-F., Cotelle S., Radetski C.M. Comparing different methods for fast screening of microbiological quality of beach sand aimed at rapid-response remediation // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 118. No. 1–2. P. 206–212. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.02.069

7. Домрачева Л.И., Кондакова Л.В., Ашихмина Т.Я., Огородникова С.Ю., Олькова А.С., Фокина А.И. Применение тетразолюно-топографического метода определения дегидрогеназной активности цианобактерий в загрязнённых средах // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 23–28.

8. Круглов Ю.В. Микробное сообщество почвы: физиологическое разнообразие и методы исследования (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2016. Т. 51. № 1. С. 46–59. doi: 10.15389/agrobiology.2016.1.46rus

9. Горленко М.В., Кожевин П.А. Мультисубстратное тестирование природных микробных сообществ. М.: МАКС Пресс, 2005. 88 с.

10. Виноградова Ю.А., Лаптева Е.М., Перминова Е.М., Анисимов С.С., Новаковский А.Б. Микробные сообщества подзолистых почв на вырубках среднетаёжных еловых лесов // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 5. С. 74–80.

11. Kalinina A.A., Makedoshin A.S., Radostin S.Yu., Gursky N.Yu., Sokolova T.N., Kartashov V.R. Application of chemical kinetics methods to the study of iodinitrotetrazolium chloride reduction in the presence of *Bacillus subtilis* cells // Moscow Univ. Chem. Bull. 2019. V. 74. No. 1. P. 20–24. doi: 10.3103/S0027131419010048

12. Калинина А.А., Македошин А.С., Гурский Н.В., Соколова Т.Н., Смирнов В.Ф. Кинетическое исследование восстановления иоднитротетразолия хлорида суспензией в физиологическом растворе грамотрицательных бактерий *Pseudomonas aeruginosa* и *Escherichia coli* // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 1. С. 25–32. doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-025-032

13. Калинина А.А., Гурский Н.В., Соколова Т.Н., Кузина О.В., Смирнов В.Ф. Влияние видовых различий бактерий рода *Bacillus* и рода *Pseudomonas* суспендированных в физиологическом растворе, на скорость восстановления иоднитротетразолия хлорида // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 145–152. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-145-152

References

1. Altman F.P. Tetrazolium salts and formazans // Prog. Histochem. Cytochem. 1976. V. 9. No. 3. P. 1–56. doi: 10.1016/s0079-6336(76)80015-0

2. Seidler E. The tetrazolium-formazan system: design and histochemistry // Prog. Histochem. Cytochem. 1992. V. 24. No. 1. P. 1–86. doi: 10.1016/S0079-6336(11)80060-4

3. Kuhn R., Jerchel D. Über Invertseifen, VIII. Reduktion von tetrazoliumsalzen durch bakterier, gärende hefe und keimende samen // Ber. Deutsch. Chem. Ges. 1941. V. 74. No. 6. P. 949–952 (in German). doi: 10.1002/cber.19410740615

4. Isa H.W.M., Johari W.L.W., Syahir A., Abd Shukor M.Y., Nor Azwady A.A., Shaharuddin N.A., Muskhazli M. Development of a bacterial-based tetrazolium dye (MTT) assay for monitoring of heavy metals // Int. J. Agric. Biol. 2014. V. 16. No. 6. P. 1123–1128. doi: 13-317/2014/16-5-1123-1128

5. Plakunov V.K., Mart'yanov S.V., Teteneva N.A., Zhurina M.V. A universal method for quantitative characterization of growth and metabolic activity of microbial biofilms in static models // Mikrobiologiya. 2016. V. 85. No. 4. P. 484–489 (in Russian) doi: 10.7868/S0026365616040157

6. Testolin R.C., Almeida T.C.M., Polette M., Branco J.O., Fischer L.L., Niero G., Poyer-Radetski G., Silva V.C., Somenzi C.A., Corrêa A.X.R., Corrêa R., Rörig L.R., Itokazu A.G., Féraud J.-F., Cotelle S., Radetski C.M. Comparing different methods for fast screening of microbiological quality of beach sand aimed at rapid-response remediation // Mar. Pollut. Bull. 2017. V. 118. No. 1–2. P. 206–212. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.02.069

7. Domracheva L.I., Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu., Olkova A.S., Fokina A.I. Application of the tetrazole-topographic method in defining dehydrogenizing activity of cyanobacteria in polluted environments // Theoretical and Applied Ecology. 2008. No. 2. P. 23–28 (in Russian).

8. Kruglov Yu.V. Microbial community of soil: physiological diversity patterns and assessment // Agricultural biology. 2016. V. 51. No. 1. P. 46–59 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiology.2016.1.46rus

9. Gorlenko M.V., Kozhevnikov P.A. Multisubstrate testing of natural microbial communities. Moskva: MAKS Press, 2005. 88 p. (in Russian).

10. Vinogradova Yu.A., Lapteva E.M., Perminova E.M., Anisimov S.S., Novakovskiy A.B. Microbe communities in podzolic soils at logged spruce forest areas of the middle taiga zone // Izvestiya of Samara Scientific Center of Russian Academy of Sciences. 2014. V. 16. No. 5. P. 74–80 (in Russian).

11. Kalinina A.A., Makedoshin A.S., Radostin S.Yu., Gurskiy N.Yu., Sokolova T.N., Kartashov V.R. Application of chemical kinetics methods to the study of iodonitrotetrazolium chloride reduction in the presence of *Bacillus subtilis* cells // Moscow Univ. Chem. Bull. 2019. V. 74. No. 1. P. 20–24. doi: 10.3103/S0027131419010048

12. Kalinina A.A., Makedoshin A.S., Gurskiy N.V., Sokolova T.N., Smirnov V.F. Kinetic study of the reduction of iodonitrotetrazolium chloride by suspension of gram-negative bacteria *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* in physiological solution // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 1. P. 25–32 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-025-032

13. Kalinina A.A., Gurckiy N.V., Sokolova T.N., Kuzina O.V., Smirnov V.F. The effect of species differences in bacteria of the genera *Bacillus* and *Pseudomonas*, suspended in saline, on the rate of recovery iodonitrotetrazolium chloride // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 25–32 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-145-152

Исследование механизма адсорбционной очистки сточных вод от поверхностно-активных веществ модифицированным отходом энергетики для снижения антропогенного воздействия на окружающую среду

© 2026. Р. Я. Исхакова, к. т. н., доцент,
Л. А. Николаева, д. т. н., зав. кафедрой,
Казанский государственный энергетический университет,
420066, Россия, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51,
e-mail: imreginaiskh@gmail.com, larisani16@mail.ru

В статье представлены результаты исследования процесса адсорбции анионных синтетических поверхностно-активных веществ из водных сред отходом энергетики – карбонатным шламом водоподготовки тепловых электрических станций, модифицированным связующим материалом – парафином (ШМП). Сорбционная ёмкость ШМП по додецилсульфату натрия (ДСН) составляет 22,1 мг/г. На основе изотерм Ленгмюра рассчитаны константы адсорбционного равновесия, изостерические теплоты адсорбции, значения свободной энергии Гиббса по уравнению Гиббса-Гельгольца. Установлено, что процесс протекает самопроизвольно. Определены основные термодинамические характеристики процесса адсорбции, на основании которых установлено, что на полученном сорбционном материале протекает физическая адсорбция. Для исследования механизма адсорбции на ШМП проведено экспериментальное определение кинетических показателей процесса. Адсорбция ДСН на ШМП реализуется на 80–90 % в первые 40–50 мин. Энергия активации адсорбции составляет 7,64 кДж/моль. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии адсорбционной очистки сточных вод ШМП на этапе локальной очистки сточных вод промышленных предприятий. Предлагаемый подход к очистке водных сред является экологически безопасным, вовлекает отходы энергетики в качестве вторичных материальных ресурсов и позволит снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду.

Ключевые слова: очистка сточных вод, адсорбция, отход производства, анионные поверхностно-активные вещества, термодинамические характеристики.

Study of the mechanism of adsorption wastewater treatment from surfactants by modified energy waste to reduce anthropogenic impact on the environment

© 2026. R. Ya. Iskhakova ORCID: 0000-0003-0339-9849, L. A. Nikolaeva ORCID: 0000-0002-7200-2318
Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan, Russia, 420066,
e-mail: imreginaiskh@gmail.com, larisani16@mail.ru

The article presents the results of a study of the anionic synthetic surfactants adsorption by energy waste – carbonate sludge from water treatment of thermal power plants, modified by a binding material – paraffin-modified sludge (PMS). Paraffin wax was used as a binding component; it is hydrophobic, insoluble, and has sorption capacity for the adsorbed surfactants. It was experimentally established that introduction of the binding component in an amount of 30 wt. % is the most appropriate. The sorption capacity of PMS is 22.1 mg/g. The adsorption isotherm belongs to type I according to the Brunauer, Emmett, and Teller classification, which indicates monomolecular adsorption. The constants of adsorption equilibrium, isosteric heats of adsorption were calculated based on Langmuir isotherms. The values of Gibbs free energy were calculated using the Gibbs-Helmholtz equation. It was found that the process occurs spontaneously. The main thermodynamic characteristics of the adsorption process were determined, based on which it was established that physical adsorption occurs on the obtained sorption material due to Van der Waals forces. To study the adsorption mechanism on PMS, an experimental determination of kinetic dependencies was carried out. The adsorption of sodium dodecyl sulfate (SDS) by PMS is realized by 80–90 % in the first 40–50 minutes. The activation energy of adsorption is 7.64 kJ/mol. The obtained research results can be used to develop the adsorption wastewater treatment technology in industrial enterprises. The environmentally safe proposed technology involves energy waste as secondary material resources and reduces the anthropogenic load on the environment.

Keywords: wastewater treatment, adsorption, industrial waste, anionic surfactants, thermodynamic characteristics.

Загрязнение природных водоёмов при недостаточной очистке сточных вод от анионных синтетических поверхностно-активных веществ (АСПАВ) представляет собой актуальную проблему, связанную с экологической безопасностью [1–3].

Повышенная концентрация АСПАВ в сточных водах промышленных предприятий может наблюдаться в случаях нарушения нормальной работы и эксплуатации оборудования при: одновременном сливе больших объёмов отработанных моющих растворов, содержащих высокие концентрации АСПАВ, после окончания цикла мойки/обезжиривания деталей или оборудования; аварийном переполнении моечных или обезжиривающих ванн; неисправности оборудования (разрыв трубопроводов, неисправность клапанов или повреждение резервуаров для хранения моющих концентратов или отработанных растворов; отказ систем дозирования и автоматики и пр.); пусконаладочных работах, ремонте и пр. [4].

При попадании АСПАВ в сточные воды возникает ряд проблем, связанных с их извлечением [5–7]. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) подавляют деятельность активного ила на биологических очистных сооружениях (как предприятий, так и городских), вызывая гибель микроорганизмов и нарушение нормального режима эксплуатации станций биологической очистки; происходит интенсивное пенообразование на очистных сооружениях, затрудняющее их работу. Высокие концентрации ПАВ токсичны для водных организмов, снижают способность водоёмов к самоочищению.

Одним из перспективных методов очистки является сорбционное удаление ПАВ из сточных вод. При этом особый интерес представляют сорбционные материалы, полученные из отходов производства [8, 9].

В настоящее время для извлечения из водных сред АСПАВ используются различные отходы и материалы, отличающиеся по их адсорбционной способности к АСПАВ, мг/г: летучая зола тепловых электрических станций (6,83 мг/г) [10], бентонит (18,32 мг/г) [11], композитные металл-органические каркасы, усиленные оксидом графена (24,48 мг/г) [12], целлюлоза из медицинских отходов (ватных шариков), модифицированная одним из самых электрохимически стабильных органических катионов $[NR_4^+]$ (32,5 мг/г) [13]. Основным недостатком разработанных материалов является высокая стоимость их получения.

Важным этапом является модификация отходов. Парафин обладает низкоэнергетической поверхностью и может рассматриваться как эффективный компонент для адсорбции АСПАВ [14].

Цель данной работы – исследование механизма процесса адсорбции анионных синтетических поверхностно-активных веществ карбонатным шламом, модифицированным парафином (ШМП), для повышения эффективности очистки сточных вод промышленных и коммунальных предприятий.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является материал на основе карбонатного шлама энергетики. В экспериментальных исследованиях использовали шлам Набережночелнинской ТЭЦ. Химический состав шлама определяли методом рентгенографического качественного фазового анализа с применением дифрактометра D 8 ADVANCE (Bruker, Германия) [15]. Согласно проведённому анализу, в шламе присутствуют (масс. %): кальцит $CaCO_3$ – $71,0 \pm 0,1$; брусит $Mg(OH)_2$ – $8,50 \pm 0,03$; порландит $Ca(OH)_2$ – $1,00 \pm 0,02$; кварц SiO_2 – $0,60 \pm 0,01$; прочие вещества – $19,0 \pm 0,2$. Также в шламе содержатся гуминовые вещества – до 15,0 масс. %, а именно на его поверхности имеется типовой набор функциональных групп гуминовых веществ: гидроксильных –ОН, иминогруппы =NH, метильной – CH_3 , метиленовой = CH_2 групп, ароматических –HC=CH– – связей, –COOH – карбоксильных групп и –ОН – спиртовых групп, что установлено методом газовой хромато-масс-спектрометрии.

Определены основные физико-технические характеристики шлама: насыпная плотность – $540,0 \pm 0,3$ кг/м³, влажность шлама – $2,50 \pm 0,04$ масс. %, pH – 8,83, гранулометрический состав представлен фракциями 0,05–1,40 мм. При проведении экспериментальных исследований влажность шламовой пульпы была снижена с 87 до 3 % путём термической сушки в сушильном шкафу при температуре 120 °C на протяжении 2 часов.

В качестве связующего компонента использовали парафин, который обладает гидрофобностью, нерастворимостью и сорбционной способностью к поглощаемым АСПАВ. Экспериментально установлено, что наиболее целесообразным является введение связующего компонента в количестве 25–30 масс. %. Водопоглощение ШМП составило 0,1 %. Для исследования сорбционной ёмкости ШМП по-

лучали гранулы диаметром 1,0–1,5 мм путём продавливания через формирующую фильеру (сито).

Проведены экспериментальные исследования по определению сорбционной ёмкости ШМП с использованием модельных растворов АСПАВ, для приготовления которых использовали додецилсульфат натрия (ДСН) (ГСО 8049-94), как наиболее часто встречающийся представитель АСПАВ. Концентрацию ДСН определяли экстракционно-фотометрическим методом с метиленовым синим на фотокolorиметре КФК-3 с учётом коэффициента разбавления. Исходная концентрация модельного раствора ДСН – 45 мг/дм³. При определении сорбционной ёмкости в статических условиях использован метод постоянных концентраций и переменных навесок. Температуру поддерживали с использованием прибора с магнитной мешалкой US-1500A с функцией нагрева (ULAB Manufacturing, Китай).

В экспериментальных исследованиях использованы растворы объёмом 100 см³; масса навески составляла 0,05; 0,1; 0,13; 0,15; 0,2; 0,5; 1; 2 г; время проведения эксперимента 1 сут.

Для определения сорбционной ёмкости ШМП к АПАВ использовали выражение:

$$A = \frac{(C_0 - C_p)}{m} V, \quad (1)$$

где A – сорбционная ёмкость, мг/г; C_0 – исходная концентрация ДСН в растворе, мг/дм³; C_p – равновесная концентрация ДСН в рас-

творе, мг/дм³; m – масса навески, г; V – объём раствора, дм³.

Для статистической обработки результатов измерений и вычисления погрешностей оценки измеряемой величины использовали ГОСТ Р 8.736-2011.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена изотерма адсорбции, полученная в статических условиях.

Как видно из рисунка 1, полученная изотерма относится к I типу по классификации Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ), которая свидетельствует о мономолекулярной адсорбции. Также данный тип изотерм характерен для микропористых материалов. Сорбционная ёмкость ШМП по АСПАВ составляет 22,1 мг/г, что сопоставимо с результатами, полученными с применением различных материалов и отходов, описанных ранее. Для изучения механизма процесса адсорбции на ШМП провели экспериментальное исследование в статических условиях при различных температурах (К): 293, 313, 323, 333. Полученные изотермы адсорбции представлены на рисунке 2.

На основании полученных изотерм адсорбции выбрана постоянная величина адсорбции, по которой построены изостеры, позволяющие выявлять зависимость концентрации от температуры (рис. 3).

По данным, представленным на рисунке 3, рассчитывается изостерическая теплота ад-

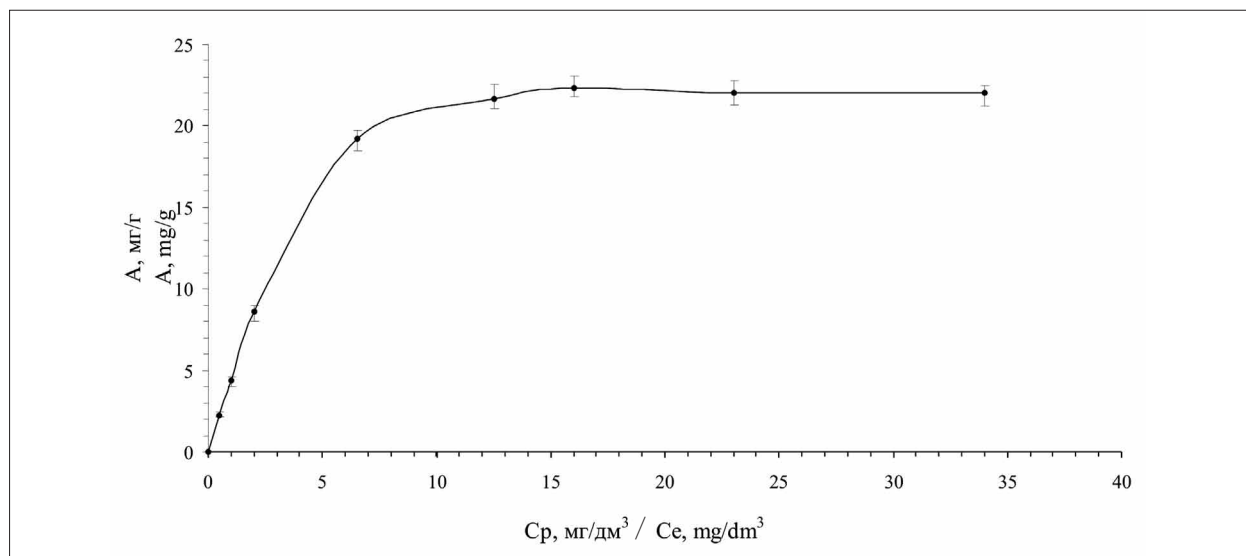


Рис. 1. Изотерма адсорбции додецилсульфата натрия (ДСН) карбонатным шламом, модифицированным парафином (ШМП). *Примечание: здесь и далее:*

Fig. 1. Adsorption isotherm of sodium dodecyl sulfate (SDS) by paraffin-modified sludge (PMS) *Note: here and further: A – sorption capacity; Ce – SDS equilibrium concentration in solution*

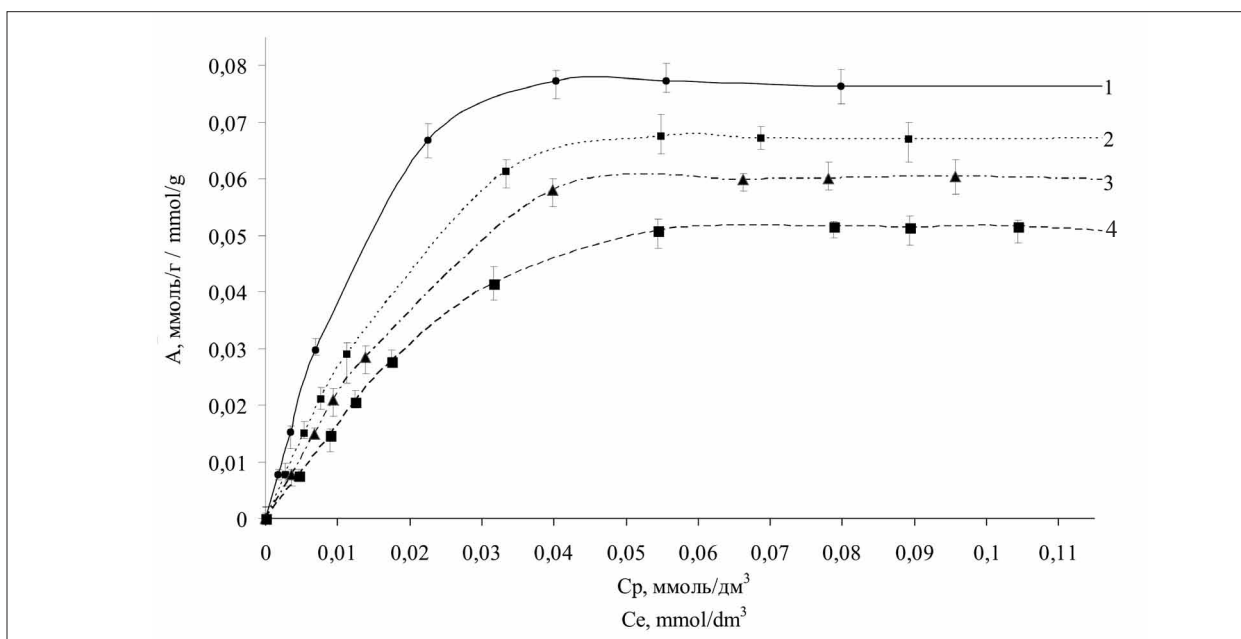


Рис. 2. Изотермы адсорбции ДСН ШМП при различных температурах:
1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К
Fig. 2. Adsorption isotherms of SDS by PMS at different temperatures:
1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 323 K, 4 – 333 K

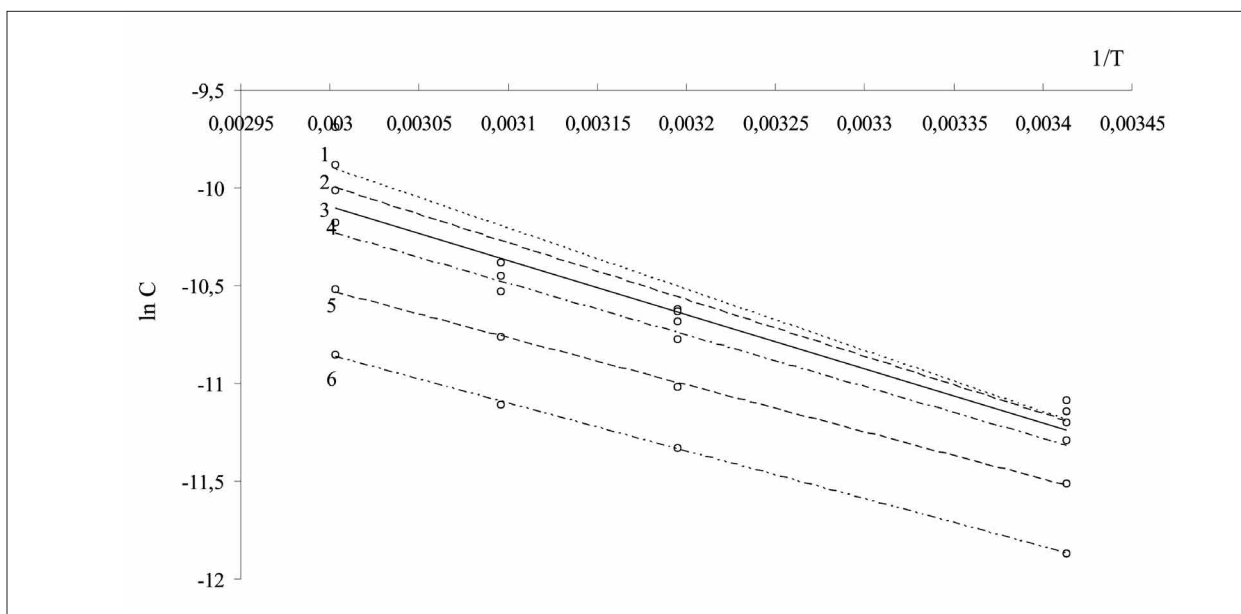


Рис. 3. Изостеры адсорбции при $A = \text{const}$: 1 – 0,052 ммоль/г; 2 – 0,05 ммоль/г; 3 – 0,048 ммоль/г;
4 – 0,045 ммоль/г; 5 – 0,038 ммоль/г; 6 – 0,03 ммоль/г
Fig. 3. Adsorption isosteres at $A = \text{const}$: 1 – 0.052 mmol/g; 2 – 0.05 mmol/g; 3 – 0.048 mmol/g;
4 – 0.045 mmol/g; 5 – 0.038 mmol/g; 6 – 0.03 mmol/g

сорбции при данной степени заполнения как тангенс угла наклона каждой прямой к оси абсцисс.

Изостерическая теплота адсорбции Q , Дж/моль, определяется по формуле (2):

$$Q = RT^2 \left(\frac{\partial \ln C}{\partial T} \right)_A = \frac{RT^2}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial T} \right)_A, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль·К; T – температура, К.

Приняв допущение, что изостерическая теплота адсорбции Q не зависит от температуры, что допустимо в узком интервале температур, уравнение интегрируется и представляется в виде (3):

$$\ln C = -\frac{Q}{R} \cdot \frac{1}{T} + \text{const.} \quad (3)$$

При этом $\text{tg}\alpha = -\frac{Q}{R}$. С помощью рисунка 4 определяются значения изостерической теплоты адсорбции (табл. 1). Величина изостерической теплоты адсорбции отрицательна, т. е. процесс адсорбции экзотермический, что характерно для физической адсорбции, обусловленной ван-дер-ваальсовыми силами.

Изостерическая теплота адсорбции позволяет учитывать неоднородность поверхности и различия в силах взаимодействия между адсорбатом и различными участками поверхности.

Для определения констант равновесия (констант Ленгмюра) изотермы адсорбции приводятся в виде уравнений Ленгмюра, которые описываются зависимостью в виде:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{A_\infty K_L} \frac{1}{C_p}, \quad (4)$$

где K_L – константа Ленгмюра; A_∞ – предельная адсорбция, ммоль/г.

Полученные значения в координатах $\frac{1}{A} = f\left(\frac{1}{C_p}\right)$ представлены на рисунке 4. Отрезок, отсекаемый на рисунке 4 по оси ординат, равен $\frac{1}{A_\infty}$, а тангенс угла наклона прямой со-

ответствует $\frac{1}{K_L A_\infty}$. Результаты представлены в таблице 2. Используя найденные из эксперимента значения констант равновесия, рассчитаны значения свободной энергии Гиббса для процесса сорбции по уравнению Гиббса-Гельмгольца (табл. 2) [16] по формуле (5):

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_L, \quad (5)$$

где ΔG^0 – стандартная энергия Гиббса, кДж/моль.

Значения свободной энергии Гиббса с повышением температуры изменяются незначительно. Отрицательные значения энергии Гиббса свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса адсорбции [17].

Полученные значения используются для расчёта удельной поверхности гранул $S_{уд}$

Таблица 1 / Table 1
Значения изостерической теплоты адсорбции (Q) / Isosteric heat of adsorption (Q) values

| | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A, ммоль/г / mmol/g | 0,03 | 0,038 | 0,045 | 0,048 | 0,05 | 0,052 |
| Q, кДж/моль / kJ/mol | -16,47 | -23,14 | -23,46 | -23,63 | -24,45 | -26,13 |

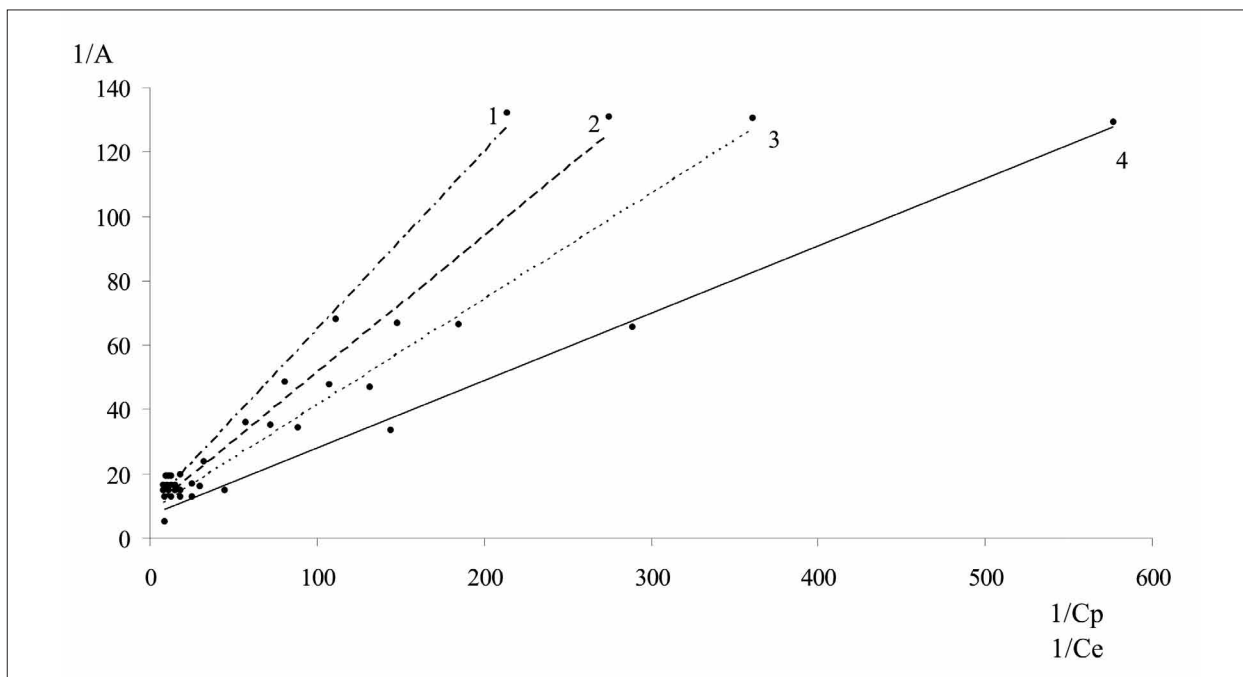


Рис. 4. Изотермы адсорбции в координатах линейного уравнения Ленгмюра при различных температурах: 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К
Fig. 4. Adsorption isotherms in the coordinates of the linear Langmuir equation at different temperatures: 1 – 293 K, 2 – 313 K, 3 – 323 K, 4 – 333 K

Таблица 2 / Table 2

Параметры адсорбционного равновесия (модель Ленгмюра)
Parameters of adsorption equilibrium (Langmuir model)

| Параметр Parameter | Температура (Т), К / Temperature (T), K | | | |
|----------------------------------|---|--------|--------|--------|
| | 293 | 313 | 323 | 333 |
| A_{∞} , ммоль/г / mmol/g | 0,1362 | 0,1182 | 0,1131 | 0,1055 |
| K_L | 35,19 | 25,76 | 20,84 | 17,15 |
| ΔG^0 , кДж/моль / kJ/mol | -8,67 | -8,45 | -8,15 | -7,86 |

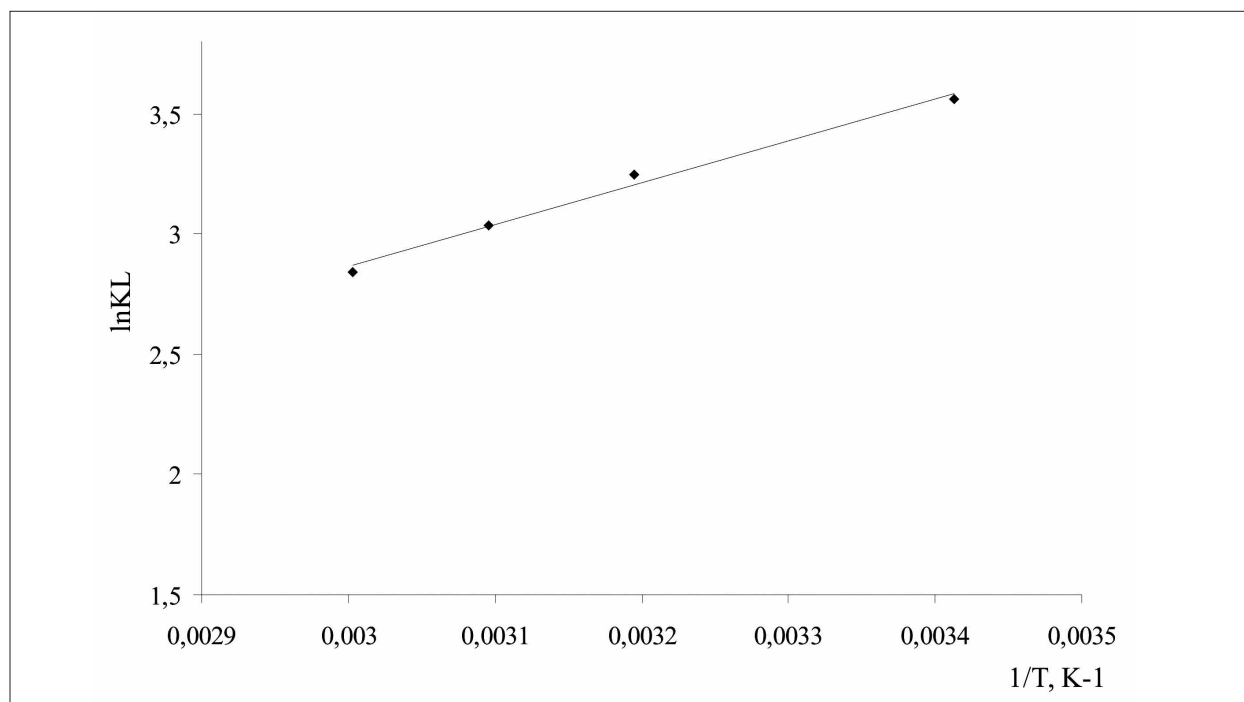


Рис. 5. Зависимость изменения $\ln K_L$ от обратной температуры
Fig. 5. Dependence of the change in $\ln K_L$ on the inverse temperature

разработанного адсорбционного материала. Удельная поверхность определяется по формуле (6):

$$S_{уд} = A_{\infty} \cdot N_A \cdot S_0, \quad (6)$$

где S_0 – площадь, которую занимает одна молекула ДСН на поверхности разработанного материала, м²; $S_{уд}$ – удельная поверхность, м²/г; N_A – число Авогадро, $6,002 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Площадь молекулы ДСН составляет $0,64 \cdot 10^{-18}$ м² [1]. Расчётное значение удельной поверхности материала составляет 52,24 м²/г.

Для более полного понимания процесса адсорбции ДСН на полученном материале проведён расчёт термодинамических параметров: энтальпии и энтропии процесса. Для расчёта энтальпии адсорбции ΔH^0 использовали уравнение (7):

$$\ln K_L = -\frac{\Delta H^0}{RT} + C. \quad (7)$$

Построен график зависимости $\ln K_L$ от значения $1/T, K^{-1}$, (рис. 5).

По полученным значениям определяли энтальпию адсорбции как: $\Delta H^0 = -Rtg\alpha$. Далее проводили расчёт значений энтропии процессов адсорбции при разных температурах по уравнению (8):

$$\Delta S^0 = \frac{\Delta H^0 + \Delta G^0}{T}. \quad (8)$$

Рассчитанные термодинамические характеристики представлены в таблице 3.

Физическая адсорбция является экзотермическим процессом. Согласно принципу Ле Шателье, повышение температуры смещает равновесие системы в сторону эндотермического процесса – десорбции, что также способствует уменьшению скорости адсорбции. Таким образом, проведённые экспериментальные исследования и их обобщения свидетельствуют о протекании физической сорбции исследуемых примесей на поверхности материала.

Таблица 3 / Table 3

Термодинамические характеристики адсорбции ДСН ШМП
Thermodynamic characteristics of SDS adsorption by PMS

| Параметр / Parameter | Температура (Т), К / Temperature (T), K | | | |
|--|---|--------|--------|-------|
| | 293 | 313 | 323 | 333 |
| ΔH^0 , кДж/моль / kJ/mol | -14,46 | | | |
| ΔG^0 , кДж/моль / kJ/mol | -8,67 | -8,45 | -8,15 | -7,86 |
| ΔS^0 , кДж/(моль·К) / kJ/(mol·K) | -19,76 | -19,19 | -19,52 | -19,8 |

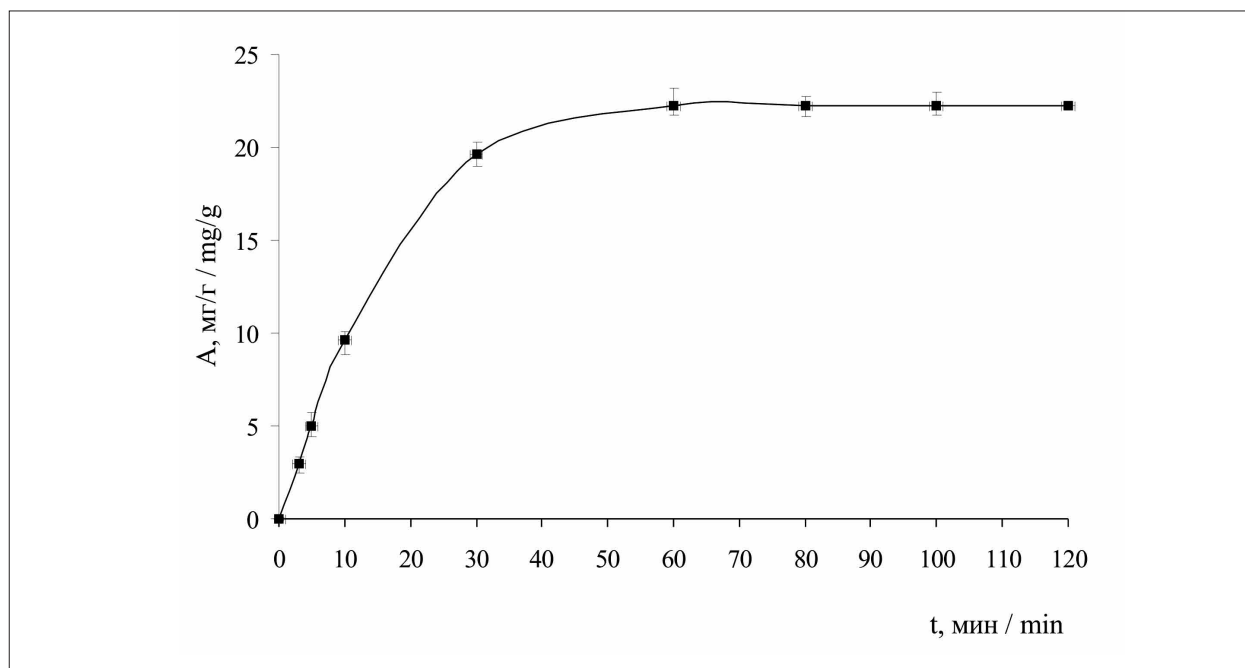


Рис. 6. Кинетическая кривая адсорбции ДСН ШМП
Fig. 6. Kinetic curve of SDS adsorption by PMS

Для исследования механизма адсорбции на ШМП проведено экспериментальное определение кинетических зависимостей. Кинетическая кривая адсорбции ДСН представлена на рисунке 6.

Адсорбция ДСН ШМП реализуется на 80–90 % в первые 40–50 мин. Продолжительность адсорбции τ составляет 60 мин.

Для исследования механизма процесса адсорбции получены кинетические кривые при различных температурах (рис. 7).

Процесс адсорбции ДСН ШМП рассматривается как обратимая реакция первого порядка [18]. В подобной реакции скорость равна разности скоростей прямой и обратной реакций, каждая из которых является реакцией первого порядка и определяется из уравнения (9):

$$-\frac{dx}{dt} = v_1 - v_2 = k_1(a - x) - k_2(b + x), \quad (9)$$

где a, b – исходные количества веществ, моль/дм³; x – количество вещества, прореагировавшего на момент времени τ , моль/дм³;

k_1 и k_2 – константы скоростей прямой и обратной реакции.

После преобразований уравнение имеет вид (10):

$$k = k_1 + k_2 = \frac{1}{\tau} \ln \left(\frac{x_\infty}{x_\infty - x} \right), \quad (10)$$

где x_∞ – количество прореагировавшего вещества на момент достижения равновесия, моль/дм³; k – эффективная константа скорости реакции.

По рисунку 8, на котором отражена зависимость изменения $\frac{\ln(C_0 - C_\infty)}{C - C_\infty}$ по времени τ ,

определили эффективную константу скорости реакции k как тангенс угла наклона. При этом

известно, что $\frac{k_1}{k_2} = K_C$, где K_C – константа равновесия, которую можно определить как

$$K_C = \frac{C_\infty}{C_0 - C_\infty}, \text{ где } C_\infty \text{ – концентрация в момент}$$

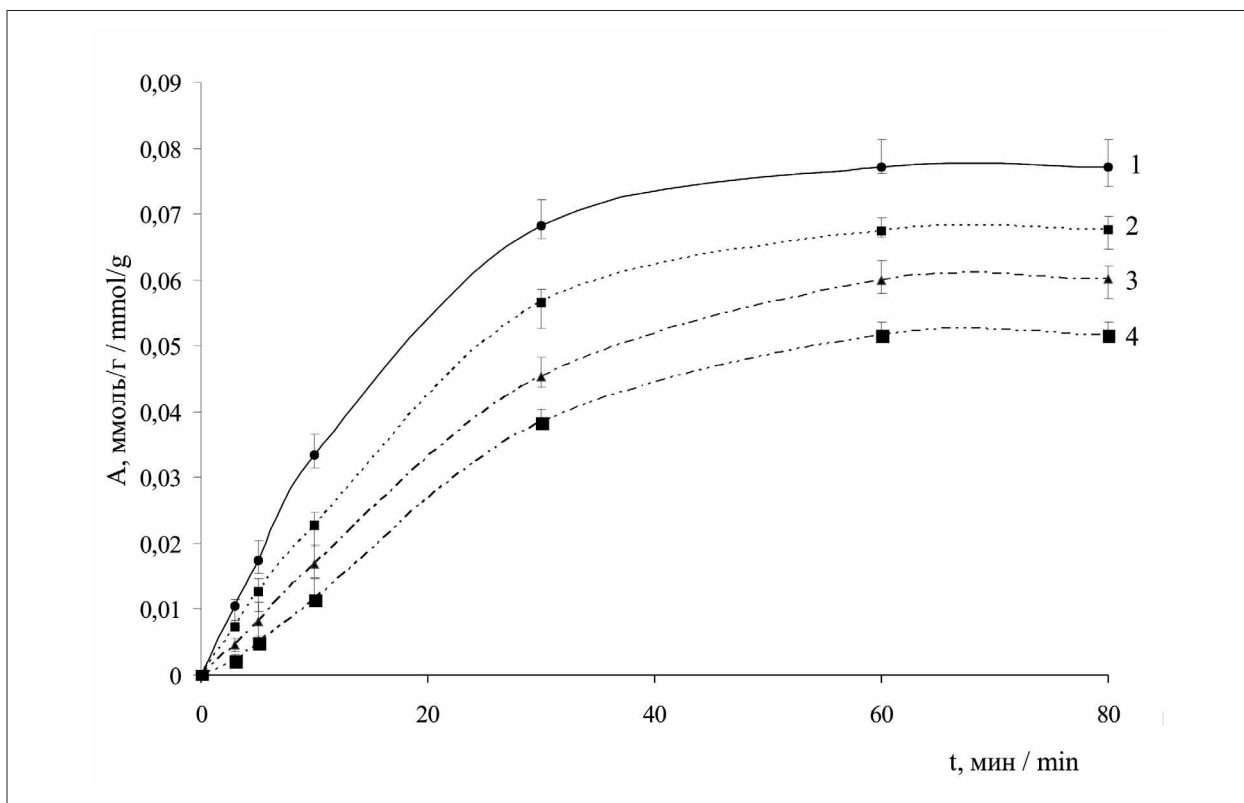


Рис. 7. Кинетические кривые адсорбции ДСН ШМП при различных температурах:
 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К
 Fig. 7. Kinetic curves of SDS adsorption by PMS at different temperatures:
 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К

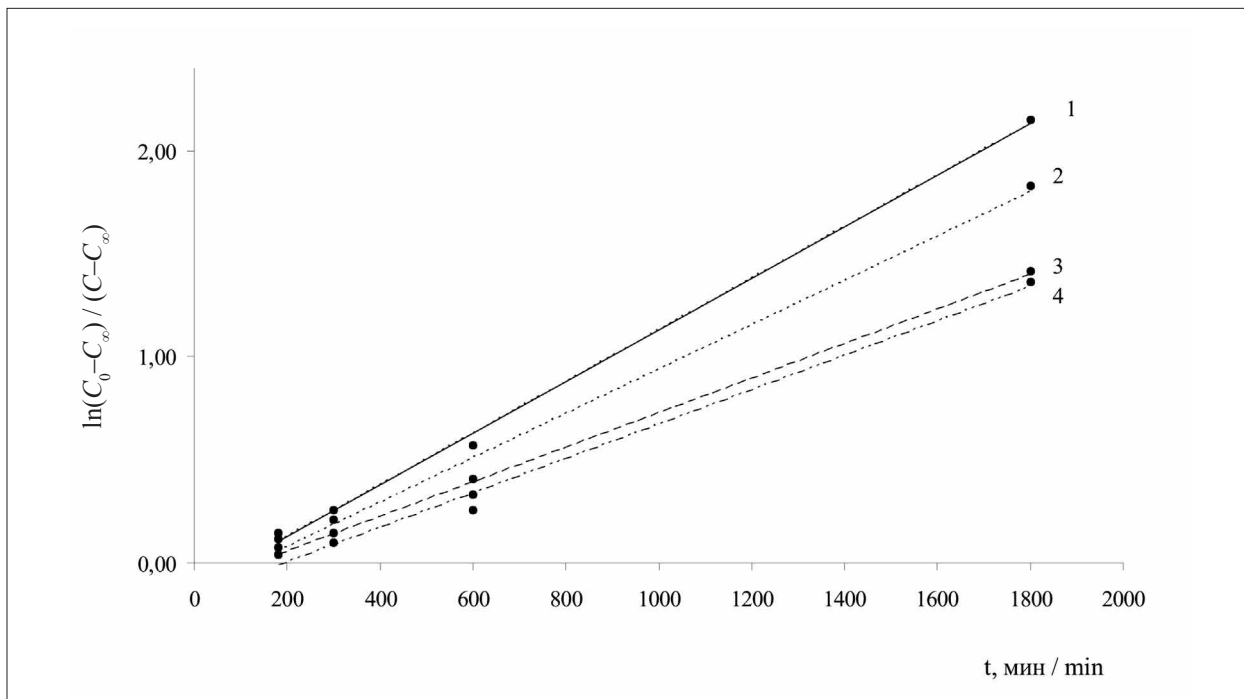


Рис. 8. Кинетические кривые адсорбции ДСН ШМП при различных температурах
 в координатах $\ln(C_0 - C_\infty) / (C - C_\infty)$: 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К
 Fig. 8. Kinetic curves of SDS adsorption by PMS at different temperatures
 in coordinates $\ln(C_0 - C_\infty) / (C - C_\infty)$: 1 – 293 К, 2 – 313 К, 3 – 323 К, 4 – 333 К

Таблица 4 / Table 4

Значения эффективных констант и констант адсорбции при различных температурах
Values of effective constants and adsorption constants at different temperatures

| Параметр Parameter | Температура (Т), К / Temperature (T), K | | | |
|---------------------------------|---|------|------|------|
| | 293 | 313 | 323 | 333 |
| $k, 10^{-3}, c^{-1} / s^{-1}$ | 0,54 | 1,12 | 1,31 | 1,44 |
| $k_1, 10^{-4}, c^{-1} / s^{-1}$ | 2,61 | 3,32 | 3,39 | 3,41 |

наступления адсорбционного равновесия. Решение системы уравнений позволяет определить константы k_1 . Рассчитанные значения k и k_1 представлены в таблице 4.

Логарифмические зависимости (рис. 8) имеют линейный вид, что подтверждает протекание адсорбции ионов в виде реакции первого порядка. При возрастании температуры происходит снижение констант скорости адсорбции, что свидетельствует о протекании физической адсорбции, которая происходит благодаря силам Ван-дер-Ваальса между молекулами адсорбента и адсорбата.

Для расчёта энергии активации адсорбции строится зависимость $\ln k_1$ от значения $1/T, K^{-1}$ (рис. 9). Расчёт значения энергии активации $E_{акт}$ основан на решении уравнения Аррениуса (11):

$$k_1 = A \cdot e^{-\frac{E_{акт}}{RT}}, \quad (11)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, как тангенс угла наклона: $\operatorname{tg}\alpha = -\frac{E_{акт}}{R}$.

Энергия активации адсорбции составляет 7,64 кДж/моль. Полученное значение характерно для протекания физической адсорбции.

Заключение

В работе исследован механизм адсорбции АСПАВ на материале, полученном из отхода энергетики со связующим. Экспериментально получены изотермы адсорбции, рассчитаны константы адсорбционного равновесия и изостерические теплоты адсорбции. Определены основные термодинамические и кинетические характеристики процесса адсорбции, которые свидетельствуют, что адсорбция носит физический характер и обусловлена ван-дер-ваальсовыми силами, процесс является экзотермическим. Определена энергия активации адсорбции. Продолжительность адсорбции додецилсульфата натрия на разработанном материале составляет 60 мин.

Таким образом, полученные результаты объясняют природу сорбционного извлечения

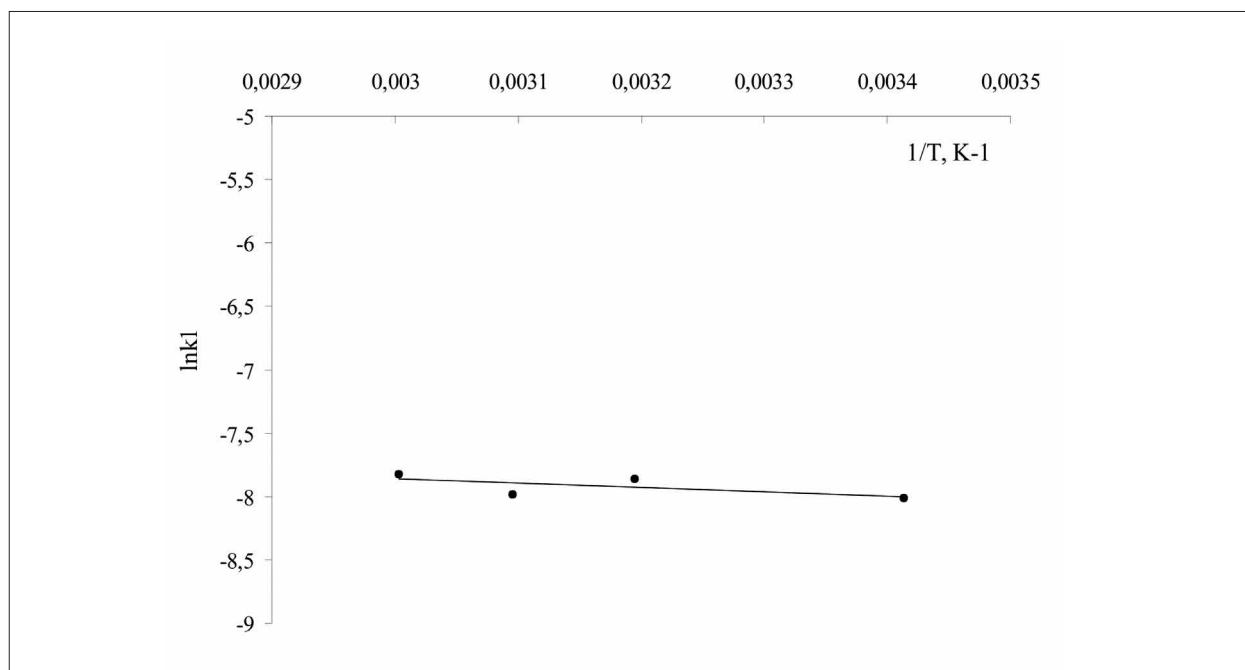


Рис. 9. Зависимость изменения $\ln k_1$ от обратной температуры ($1/T$)
Fig. 9. Dependence of the $\ln k_1$ change on the inverse temperature ($1/T$)

АСПАВ на разработанном материале и могут быть использованы при разработке экологически безопасных технологий локальной очистки сточных вод.

Работа выполнена за счёт предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан № 9 от 01.12.2025.

Литература

1. Шачнева Е.Ю. Поверхностно-активные вещества в объектах окружающей среды. Методы очистки сточных вод. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 65 с.
2. Liu X., Zorina T.G. Regional pollution and the geographical distribution of pollution intensive industries in China // Kazan State Power Engineering University Bulletin. 2024. V. 16. No. 3 (63). P. 106–119.
3. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review // Water Res. 2018. V. 147. No. 12. P. 60–72. doi: 10.1016/j.watres.2018.09.039
4. Ильин В.И. Технологические процессы и способы очистки производственных сточных вод. М.: ПХТУ им. Д. И. Менделеева, 2014. 103 с.
5. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Low A., Rabat N.E. A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater // Journal of Environmental Management. 2020. V. 254. Article No. 109797. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109797
6. Закиров Р.К., Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С. Перспективы сонохимической обработки сточных вод, содержащих синтетические поверхностно-активные вещества // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 111–116. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116
7. Экспериментальные методы в очистке сточных вод: монография / гл. ред. М. ван Лосдрехт, П.Х. Нильсен, К. Лопес-Васкес, Д. Брджанович. Томск: изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. 346 с.
8. Kangina O.A., Chernysheva M.G., Badun G.A., Lishai A.V., Tsygankova N.G., Savitskaya T.A., Grinshpan D.D. Anionic surfactant adsorption on activated carbons produced from lignin and modified with cellulose sulfacetate // Colloid J. 2024. V. 86. P. 33–39. doi: 10.1134/S1061933X23601117
9. Шабуров Е.Л., Деревянко О.В., Федюхин А.В., Смятская Ю.А., Политаева Н.А. Определение теплотворной способности отработанных сорбентов из остаточной биомассы *Chlorella Sorokiniana* и ряски *Lemna minor* // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 3-4. С. 113–121.

10. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Rabat N.E., Zulfiqar M., Ayoub M., Azizli K.A. Removal of anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water using fly ash adsorbent // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 458. Article No. 012043. doi: 10.1088/1757-899X/458/1/012043
11. Solińska A., Marchewka J., Sitarz M., Bajda T. Infrared spectroscopy: the key to elucidating the sorption mechanism of surfactants, dyes and pharmaceuticals on mineral composite material // Spectrochimica Acta A Mol. Biomol. Spectrosc. 2023. V. 299. Article No. 122758. doi: 10.1016/j.saa.2023.122758
12. Mkilima T., Zharkenov Y., Utepbergenova L., Abduova A., Sarypbekova N., Smagulova E., Abdulkalikova G., Kamidulla F., Zhumadilov I. Harnessing graphene oxide-enhanced composite metal-organic frameworks for efficient wastewater treatment // Water Cycle. 2024. V. 5. P. 86–98. doi: 10.1016/j.watcyc.2024.02.005
13. Zou M., Zhang H., Miyamoto N., Kano N., Okawa H. Adsorption of an anionic surfactant (sodium dodecyl sulfate) from an aqueous solution by modified cellulose with quaternary ammonium // Polymers (Basel). 2022. V. 14. No. 7. Article No. 1473. doi: 10.3390/polym14071473
14. Стрельцова Е.А., Гросул А.А. Адсорбция додецилсульфата натрия, хлорида додециламмония и Твинов из водных растворов на парафине // Сорбционные и хроматографические процессы. 2014. Т. 14. Вып. 1. С. 129–137.
15. Николаева Л.А., Исакова Р.Я. Адсорбционная очистка газовых выбросов отходом производства от оксидов азота // Наука и техника в газовой промышленности. 2023. № 1 (93). С. 99–106.
16. Dolganov A.V., Balandina A.V., Chugunov D.B., Timonina A.S., Klimaeva L.A., Shingina V.V., Knyazev A.V. Kinetic and thermodynamic characteristics of the sorption of fluoride ions using a composite based on cellulose and alumina // Russ. J. Phys. Chem. 2020. V. 94. P. 2121–2125. doi: 10.1134/S0036024420100076
17. Сютова Е.А., Джигола Л.А. Исследование кинетических закономерностей твердофазного концентрирования ионов кальция природными сорбентами // Сорбционные и хроматографические процессы. 2020. Т. 20. № 1. С. 64–78. doi: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2381
18. Yakovleva A.A., Nguyen T.T. Characteristics of sorption on surfaces of river sands with the participation of iron(III) ions // Russ. J. Phys. Chem. 2021. V. 95. P. 1216–1221. doi: 10.1134/S0036024421060285

References

1. Shachneva E.Yu. Surfactants in the Environment. Wastewater Treatment Methods. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 65 p. (in Russian).
2. Liu X., Zorina T.G. Regional pollution and the geographical distribution of pollution intensive industries in China // Kazan State Power Engineering University Bulletin. 2024. V. 16. No. 3 (63). P. 106–119.

3. Palmer M., Hatley H. The role of surfactants in wastewater treatment: Impact, removal and future techniques: A critical review // *Water Res.* 2018. V. 147. No. 12. P. 60–72. doi: 10.1016/j.watres.2018.09.039
4. Il'in V.I. Technological processes and methods for treating industrial wastewater. Moscow: RKHTU im. D. I. Mendeleeva, 2014. 103 p. (in Russian).
5. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Low A., Rabat N.E. A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater // *Journal of Environmental Management.* 2020. V. 254. Article No. 109797. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109797
6. Zakirov R.K., Akhmadullina F.Y., Balymova E.S. Prospects for sonochemical treatment of wastewater containing synthetic surfactants // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 111–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-111-116
7. Experimental methods in wastewater treatment: monograph / Eds. M. van Losdrekht, P.H. Nil'sen, K. Lopes-Vaskes, D. Brdjanovic. Tomsk: izd-vo TGASU, 2020. 346 p. (in Russian).
8. Kangina O.A., Chernysheva M.G., Badun G.A., Lishai A.V., Tsygankova N.G., Savitskaya T.A., Grinshpan D.D. Anionic surfactant adsorption on activated carbons produced from lignin and modified with cellulose sulfoacetate // *Colloid J.* 2024. V. 86. P. 33–39. doi: 10.1134/S1061933X23601117
9. Shaburov E.L., Derevianko O.V., Fedyuhin A.V., Smyatskaya Yu.A., Politaeva N.A. Determination of thermal capacity of processed sorbents from residual biomass of *Chlorella Sorokiniana* and duckweed *Lemna minor* // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki.* 2019. V. 21. No. 3-4. P. 113–121 (in Russian).
10. Siyal A.A., Shamsuddin M.R., Rabat N.E., Zulfiqar M., Ayoub M., Azizli K.A. Removal of anionic surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water using fly ash adsorbent // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. V. 458. Article No. 012043. doi: 10.1088/1757-899X/458/1/012043
11. Solińska A., Marchewka J., Sitarz M., Bajda T. Infrared spectroscopy: the key to elucidating the sorption mechanism of surfactants, dyes and pharmaceuticals on mineral composite material // *Spectrochimica Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2023. V. 299. Article No. 122758. doi: 10.1016/j.saa.2023.122758
12. Mkilima T., Zharkenov Y., Utepbergenova L., Abduova A., Sarypbekova N., Smagulova E., Abdulkalova G., Kamidulla F., Zhumadilov I. Harnessing graphene oxide-enhanced composite metal-organic frameworks for efficient wastewater treatment // *Water Cycle.* 2024. V. 5. P. 86–98. doi: 10.1016/j.watcyc.2024.02.005
13. Zou M., Zhang H., Miyamoto N., Kano N., Okawa H. Adsorption of an anionic surfactant (sodium dodecyl sulfate) from an aqueous solution by modified cellulose with quaternary ammonium // *Polymers (Basel).* 2022. V. 14. No. 7. Article No. 1473. doi: 10.3390/polym14071473
14. Streltsova E.A., Grosul A.A. Adsorption of sodium dodecyl sulfate, alkylammonium chloride and Twins from water solution on the paraffin // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2014. V. 14. No. 1. P. 129–137 (in Russian).
15. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ya. Adsorption purification of gas emissions from industrial waste from nitrogen oxides // *Science and Technology in the Gas Industry.* 2023. No. 1 (93). P. 99–106 (in Russian).
16. Dolganov A.V., Balandina A.V., Chugunov D.B., Timonina A.S., Klimaeva L.A., Shingina V.V., Knyazev A.V. Kinetic and thermodynamic characteristics of the sorption of fluoride ions using a composite based on cellulose and alumina // *Russ. J. Phys. Chem.* 2020. V. 94. P. 2121–2125. doi: 10.1134/S0036024420100076
17. Syutova E.A., Dzhigola L.A. Study of kinetic regularities of solid-phase concentration of calcium ions by natural sorbents // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy.* 2020. V. 20. No. 1. P. 64–78 (in Russian). doi: 10.17308/sorpchrom.2020.20/2381
18. Yakovleva A.A., Nguyen T.T. Characteristics of sorption on surfaces of river sands with the participation of iron(III) ions // *Russ. J. Phys. Chem.* 2021. V. 95. P. 1216–1221. doi: 10.1134/S0036024421060285

Респираторная активность и деструкция нефтепродуктов в почвах, содержащих гранулированный осадок сточных вод

© 2026. А. А. Утомбаева, аспирант, м. н. с.,
А. А. Вершинин, к. б. н., с. н. с., Э. Р. Зайнулгабидинов, к. б. н., с. н. с.,
А. М. Петров, к. б. н., в. н. с., зав. лабораторией,
Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,
420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,
e-mail: semionova.alin@yandex.ru

Нефтяное загрязнение почв является одной из наиболее серьёзных экологических проблем, требующих разработки эффективных и экономичных методов рекультивации. Биологические методы, в частности биоремедиация с использованием органических мелиорантов, представляют особый интерес, так как позволяют активировать аборигенную микробиоту и ускорить разложение поллютантов. Одним из перспективных материалов для биоремедиации нефтезагрязнённых почв может служить термически обработанный гранулированный осадок городских сточных вод (гранулят). Он содержит микроорганизмы, органические и биогенные вещества, что требует оценки его эффективности при рекультивации нефтезагрязнённых почв. Впервые в модельном эксперименте изучено влияние различных доз гранулированного осадка сточных вод на параметры процесса рекультивации нефтезагрязнённой серой лесной почвы: дыхательную активность, эколого-физиологическое состояние микробного пула и эффективность деструкции нефтепродуктов (НП). Исследование охватило три подхода: техническую, микробиологическую и фито-микробиологическую рекультивацию. По результатам исследования установлено, что внесение гранулята в дозах 2 и 4 % достоверно усиливает базальное и субстрат-индуцированное дыхание загрязнённой почвы, причём максимальная эмиссия CO_2 наблюдалась в опытах по фито-микробиологической рекультивации с 4 % гранулята. Показано, что применение гранулята в образцах с низким содержанием НП (до 3,7 г/кг) не интенсифицировало их деструкцию. Наибольшая эффективность деструкции НП (снижение содержания на 69–79 % от исходного) была достигнута при концентрации загрязнителя 4,4–15,4 г/кг в опыте по микробиологической рекультивации с 2 % гранулята. Сделан ключевой вывод, что для почв с содержанием НП более 3,7 г/кг внесение 2 % гранулированного осадка обеспечивает оптимальное соотношение «эффективность деструкции / эмиссия CO_2 », приводя к максимальному разложению загрязнителя при минимальном росте выбросов углекислого газа. Выращивание высших растений не приводило к значимому дополнительному эффекту, что указывает на перспективность применения технологически более простого микробиологического подхода с использованием 2 % гранулята при рекультивации нефтезагрязнённых почв.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, нефтепродукты, почвенное дыхание, гранулят, осадок сточных вод, биологическая рекультивация.

Soil respiratory activity and oil products degradation when adding granulated sewage sludge

© 2026. А. А. Utombaeva ORCID: 0000-0002-7407-9108, А. А. Verшинin ORCID: 0000-0002-1807-5727,
Е. Р. Zainulgabidinov ORCID: 0000-0002-5372-9984, А. М. Petrov ORCID: 0000-0002-5117-2609,
Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth
Use of Tatarstan Academy of Sciences,
28, Daurkaya St., Kazan, Russia, 420087,
e-mail: semionova.alin@yandex.ru

Oil contamination of soils is one of the most serious environmental problems that require developing effective and cost-efficient remediation methods. Biological approaches, particularly bioremediation using organic ameliorants, are of special interest as they can activate the indigenous microflora and accelerate pollutant degradation. One promising material for the bioremediation of oil-contaminated soils is thermally treated granulated sewage sludge (granulate). It contains microorganisms, organic matter, and biogenic elements, which warrants an assessment of its efficacy in the remediation of oil-polluted soils. A model experiment was conducted for the first time studying the granulate effect on the remediation parameters of an oil-contaminated grey forest soil. These parameters included respiratory activity, the eco-physiological status of the microbial pool, and the efficiency of total petroleum hydrocarbon (TPH) degradation. The research encompassed three remediation approaches: technological, microbiological, and phyto-microbiological.

The study established that 2 % and 4 % granulate application significantly enhanced both the basal and substrate-induced respiration of the contaminated soil. The maximum CO₂ emission was observed in the phyto-microbiological remediation trials with 4 % granulate. It was shown that the use of granulate in samples with low TPH content (up to 3.7 g/kg) did not intensify their degradation. The highest TPH degradation efficiency (a 69–79 % reduction from the initial content) was achieved at a contaminant concentration of 4.4–15.4 g/kg in the microbiological remediation experiment with 2 % granulate. We conclude that the application of 2 % granulated sewage sludge provides an optimal “degradation efficiency / CO₂ emission” ratio for soils with a TPH content exceeding 3.7 g/kg. This leads to maximum pollutant breakdown with a minimal increase in carbon dioxide emissions. The cultivation of higher plants did not yield a significant additional effect, indicating the promise of applying the technologically simpler microbiological approach with 2 % granulate for the remediation of oil-contaminated soils.

Keywords: oil pollution, petroleum products, soil respiration, granulate, sewage sludge, biological remediation.

Обеспечение продовольственной безопасности, необходимость сохранения окружающей среды (ОС) в очередной раз поднимают вопрос о необходимости возврата деградированных, в том числе загрязнённых нефтью и нефтепродуктами почв в хозяйственный оборот. В связи с этим требуется поиск простых и эффективных приёмов восстановления плодородия, снижения вредного влияния поллютантов на природную среду. Методы биологической рекультивации (биоремедиации) экономически выгодны и за счёт повышения активности аборигенных и привнесённых микроорганизмов обеспечивают достаточно быстрое и эффективное окисление нефтяных углеводородов до простых, безопасных для ОС веществ. Анализ интенсивности почвенного дыхания позволяет оценить состояние и активность микробного пула, определить время восстановления агрохимических и биологических свойств почвы [1–3]. Посадка растений активизирует биохимические процессы, ускоряет деструкцию присутствующих в почве поллютантов [4–7].

Ранее нами была показана возможность использования гранулированного продукта (далее гранулят), полученного из обезвоженного и термически обработанного осадка муниципальных сточных вод г. Казани, при рекультивации нефтезагрязнённых почв [8]. Было установлено, что он содержит широкий спектр характерных для почв микроорганизмов, необходимые для развития растений органические вещества и биогенные элементы. Определено влияние гранулята в дозе 10 т/га на дыхательную активность, рост и продуктивность растений, эффективность деструкции нефтепродуктов в зависимости от их содержания и метода биологической рекультивации [9, 10].

С учётом необходимости сокращения сроков восстановительных мероприятий целесообразно рассмотреть влияние разных доз гранулята на скорость разложения нефтепро-

дуктов (НП), взаимосвязь деструкционных процессов с уровнем эмиссии CO₂ в атмосферу.

Цель работы – установить влияние обезвоженного и термически обработанного осадка городских сточных вод на дыхательную активность почвенных микроорганизмов и эффективность деструкции нефтепродуктов в процессе рекультивации загрязнённой нефтью почвы.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись серая лесная среднесуглинистая почва (gray forest soil) со следующими агрохимическими показателями: гумус – 4,4 %; C_{орг.} – 2,8 %; N_{вал.} – 0,21 %; (P₂O₅)_{вал.} – 0,07 %; (K₂O)_{подв.} – 8,1 мг/100г; (P₂O₅)_{подв.} – 10,3 мг/100г; рН_{вод.} – 6,25; обезвоженный и термически обработанный устойчивый к влаге и механическому воздействию гранулированный осадок сточных вод (ОСВ) с биологических очистных сооружений г. Казани (табл. 1).

Опытные образцы В1, В2, В3, В4 были получены путём внесения сернистой, парафинистой, смолистого типа нефти Ямашинского месторождения в высушенную до воздушно-сухого состояния почву из расчёта 12, 25, 45 и 60 г/кг, соответственно. Контролем служила незагрязнённая нефтью почва. В исследованиях применяли ёмкости высотой 9 см, содержащие по 0,4 кг почвы. Количество повторностей в каждом варианте опытов – 3. Далее контрольные и опытные образцы увлажняли дистиллированной водой до влажности 20–25 %. После месячной выдержки при температуре 19–25 °С, и еженедельном перемешивании почвенные образцы делили на 3 части, одну оставляли в исходном виде, а в две части вносили гранулят (2 или 4 %) и определяли в них содержание НП.

Исследования с разными дозами гранулята проводились отдельно и включали опыты по биологической (микробиологическая – опыты

Таблица 1 / Table 1

Основные характеристики гранулята осадка сточных вод
Main characteristics of sewage sludge granulate

| Влажность, % Moisture, % | Органическое вещество, % Organic matter, % | Зольность, % Ash content, % | N _{общ.} , % N _{total} , % | P _{общ.} , % P _{total} , % | K _{общ.} , % K _{total} , % | P _{подв.} , мг/кг P _{mob.} , mg/kg | pH _{KCl} | Класс опасности Hazard class |
|-----------------------------|---|--------------------------------|---|---|---|---|-------------------|---------------------------------|
| 6,3 ± 0,6 | 60,4 ± 0,9 | 39,6 ± 0,8 | 3,0 ± 0,2 | 1,5 ± 0,1 | 0,18 ± 0,03 | 2000 ± 400 | 6,2 ± 0,2 | IV |

Таблица 2 / Table 2

Начальное содержание нефтепродуктов в опытах с разными дозами гранулята
Oil products initial concentration in the experiments with different granulate content

| Вариант Variant | Нефтепродукты, г/кг / Oil products, g/kg | |
|--------------------|--|---------------------------|
| | 2 % гранулята / granulate | 4 % гранулята / granulate |
| K | 0,03 ± 0,01 | 0,03 ± 0,01 |
| B1 | 2,7 ± 0,7 | 3,7 ± 0,9 |
| B2 | 6,1 ± 1,5 | 7,5 ± 1,9 |
| B3 | 14,4 ± 3,6 | 15,4 ± 3,9 |
| B4 | 19,7 ± 4,9 | 19,2 ± 4,8 |

Примечание (здесь и далее): K, B1, B2, B3, B4 – опытные образцы с разным начальным содержанием нефтепродуктов (см. в тексте).

Note (here and below): K – control, and B1, B2, B3, B4 – test specimens, with an initial content of oil products 0, 12, 25, 45, and 60 g/kg, respectively.

М2 и М4; фито-микробиологическая – опыты ФМ2 и ФМ4) и технической (Т2 и Т4) рекультивации. В опытах по технической рекультивации в качестве контроля (К) использовали «чистую» почву, в опытах по биологической рекультивации контролем служила «чистая» почва, в которую был внесён гранулят в дозе 2 или 4 %. Начальное содержание НП в почвенных образцах перед опытами представлено в таблице 2.

Опыты по технической рекультивации предусматривали периодическое увлажнение и еженедельное перемешивание незагрязнённых и загрязнённых нефтью почвенных образцов. Их проводили одновременно с опытами по биологической рекультивации, которая предусматривала внесение гранулята, содержащего комплекс характерных для почв микроорганизмов [9]. В опытах по фито-микробиологической рекультивации дополнительно осуществляли посев и культивирование смеси высших растений ржи посевной (*Secale cereale* L.) и вики посевной (*Vicia sativa* L.).

Контрольные и опытные почвенные образцы инкубировали 6 недель при температуре 19–25 °С, влажности почвы 20–25 %, режиме освещения 16 ч в сутки (4000–4300 лк).

Опыты по фито-микробиологической рекультивации проводили по методике ГОСТ Р ИСО 22030-2009, согласно которой в каждую ёмкость высевали по 12 семян (6 семян ржи и 6 семян вики). Через 2 недели культиви-

рования, согласно методике, в каждой ёмкости оставляли по 6 растений (3+3), которые культивировали ещё в течение 4 недель. На 42 сутки растения удаляли, а почвенные образцы анализировали.

Интенсивность почвенного дыхания определяли газохроматографическим методом на хроматографе Хроматек-Кристалл 5000.2. Детектор – катарометр. Использовали колонку длиной 3,0 м, с внутренним диаметром 3 мм. Адсорбент HayesepN 80/100. Содержание CO₂ выражали в мкг CO₂/г воздушно-сухой почвы в час [11]. Для определения скорости базального дыхания (V_{базал.}) в пенициллиновые флаконы вносили 2 г почвы, 0,4 см³ стерильной воды и инкубировали в закрытом состоянии при температуре 22 °С в течение 22–24 ч [12]. При определении скорости субстрат-индуцированного дыхания (V_{сид.}) во флаконах воду заменяли 5 % раствором глюкозы (0,4 см³). Почвенные образцы инкубировали при температуре 22 °С в течение 120 мин [12]. Коэффициент микробного дыхания (Q_r) вычисляли, исходя из показателей базального и субстрат-индуцированного дыхания по формуле $Q_r = V_{\text{базал.}} / V_{\text{сид.}}$ [13].

Содержание НП в почвенных образцах определяли на анализаторе КН-2м ИК-спектрофотометрическим методом согласно ПНД Ф 16.1.2.2.22-98.

Для обработки статистической информации применяли программное обеспечение

Microsoft Office Excel 2010 и Statistica 2007. Были определены значения среднего арифметического и ошибки среднего ($M \pm m$), выполнена проверка достоверности различий с помощью U-критерия Манна-Уитни ($p \leq 0,05$) и рассчитан размер эффекта по D-Коэну [14, 15].

Результаты и обсуждение

Полученный из ОСВ гранулированный продукт содержит широкий перечень обогащающих почвы микроорганизмов, является органоминеральным удобрением, которое при внесении в почву активизирует биохимические процессы, ускоряет развитие растений, повышает их продуктивность при росте на деградированных и загрязнённых почвах [9, 16].

Попадание нефти в почву, как правило, приводит к усилению почвенного дыхания [1, 17, 18]. Эффект его усиления был отмечен и при выращивании редьки масличной для сидерации [19], что явилось основанием для проведения эксперимента по фитомикробиологической рекультивации.

Добавление гранулированного продукта в почву привело к повышению $V_{\text{базал.}}$ и $V_{\text{сид.}}$, которое было в целом пропорционально концентрации внесённого гранулята (табл. 3).

Характеризующие доступность субстрата показатели $V_{\text{базал.}}$ во всех вариантах опытов по технической рекультивации (Т2 и Т4) незначительно отличались друг от друга (D-Коэна $< 0,5$ и $D < 0,2$, соответственно), не превышали $11,7 \pm 0,2$ мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$, и были значительно ниже, чем в опытах по микробиологической и фитомикробиологической рекультивации (рис. 1).

В опытах по микробиологической рекультивации скорость базального дыха-

ния уступала таковой в опытах по фитомикробиологической рекультивации.

В опытах с дозой гранулята 4 % отмечен самый большой статистически достоверный рост $V_{\text{базал.}}$, доза гранулята 2 % в меньшей степени стимулировала почвенное дыхание. В поставленных опытах в вариантах с большим содержанием НП в почве фиксировалась самая высокая $V_{\text{базал.}}$, однако, в опыте по фитомикробиологической рекультивации при дозе гранулята 4 % в варианте, содержащем максимально испытанную концентрацию НП (19,2 г/кг), зарегистрировано снижение $V_{\text{базал.}}$ (рис. 1).

Субстрат-индуцированное дыхание отражает долю жизнеспособных микробных клеток в почвенном биоценозе. Определение данного показателя имеет прогностическое значение, поскольку позволяет судить об активности микробного пула и его потенциале [20–22]. В опытах Т2 и Т4 уровень $V_{\text{сид.}}$ практически не зависел от содержания поллютанта и имел близкие к незагрязнённым нефтью (контрольным) почвенным образцам значения (D-Коэна $< 0,2$) (рис. 2). В вариантах В2 и В3 данного опыта с концентрацией поллютанта 6,1 и 14,4 г/кг скорость субстрат-индуцированного дыхания была достоверно в 1,4 и 1,1 раза выше, а в варианте В4 (НП – 19,7 г/кг) на 30 % ниже, чем в контроле. В опыте ФМ2 в вариантах В1–В3 (НП – 2,7–14,4 г/кг) $V_{\text{сид.}}$ была в 1,9–2,0 выше, в В4 (НП – 19,7 г/кг) в 1,4 раза выше, чем в контроле (эффект по D-Коэну $> 4,0$).

Внесение в почву гранулята в дозе 4 % приводило к повышению активности микробного пула. Наибольшие значения $V_{\text{сид.}}$ ($120,2 \pm 1,6$ и $123,1 \pm 1,4$ мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{час}$) наблюдались в вариантах В3 и В4 опыта М4, содержащих 15,4 и 19,2 г/кг НП. В опыте

Таблица 3 / Table 3

Начальные значения $V_{\text{базал.}}$ и $V_{\text{сид.}}$ почвенных образцов до и после внесения гранулята (мкг $\text{CO}_2/\text{г}\cdot\text{ч}$)
 V_{basal} and $V_{\text{sir.}}$ initial values in soil samples before and after granulate application ($\mu\text{g CO}_2/\text{g}\cdot\text{h}$)

| Вариант Variant | 2 % гранулята / granulate | | | | | | 4 % гранулята / granulate | | | | | |
|--------------------|--|------|------|-------------------------------------|-------|-------|--|------|------|-------------------------------------|-------|-------|
| | $V_{\text{базал.}} / V_{\text{basal}}$ | | | $V_{\text{сид.}} / V_{\text{sir.}}$ | | | $V_{\text{базал.}} / V_{\text{basal}}$ | | | $V_{\text{сид.}} / V_{\text{sir.}}$ | | |
| | Т | М | ФМ | Т | М | ФМ | Т | М | ФМ | Т | М | ФМ |
| | Т | М | PhM | Т | М | PhM | Т | М | PhM | Т | М | PhM |
| К | 3,2 | 28,7 | 28,7 | 12,8 | 53,4 | 53,4 | 3,0 | 54,4 | 54,4 | 17,1 | 128,5 | 128,5 |
| В1 | 5,9 | 33,6 | 33,6 | 19,5 | 100,4 | 100,4 | 5,8 | 63,2 | 63,2 | 19,6 | 201,4 | 201,4 |
| В2 | 6,5 | 31,4 | 31,4 | 22,4 | 88,8 | 88,8 | 6,1 | 55,6 | 55,6 | 23,0 | 164,6 | 164,6 |
| В3 | 8,4 | 38,5 | 38,5 | 27,6 | 97,1 | 97,1 | 6,0 | 54,8 | 54,8 | 22,4 | 150,1 | 150,1 |
| В4 | 9,6 | 42,0 | 42,0 | 32,9 | 78,9 | 78,9 | 5,8 | 53,3 | 53,3 | 22,0 | 95,1 | 95,1 |

Примечание: Т – значения до внесения гранулята; М, ФМ – значения после внесения гранулята.

Note: V_{basal} – basal respiration; $V_{\text{sir.}}$ – substrate-induced respiration; Т – technological remediation, values before granulate application; М – microbiological and PhM – phyto-microbiological remediation, values after granulate application.

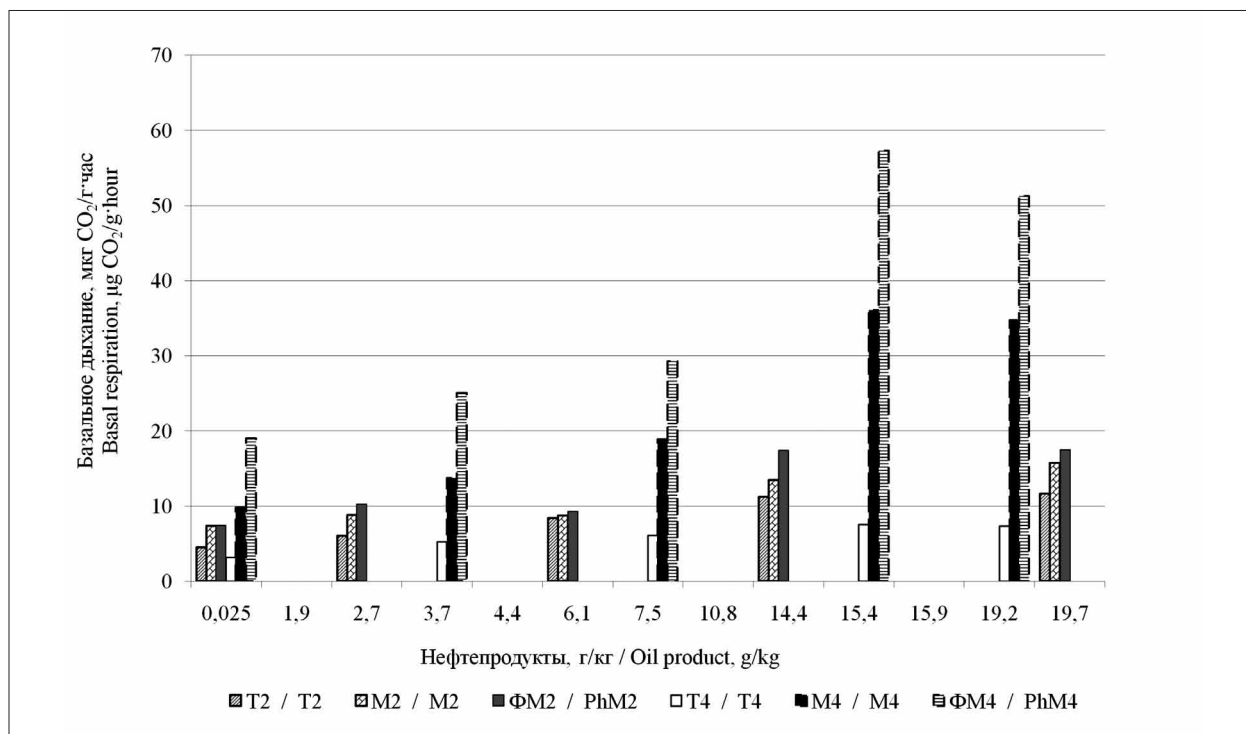


Рис. 1. Влияние дозы гранулята и концентрации нефтепродуктов на скорость базального дыхания почвы при её рекультивации / **Fig. 1.** Effect of granulate and oil product concentration on soil basal respiration rate during remediation

Примечание (здесь и далее на рисунках и в таблицах): тип рекультивации: T2 и T4 – техническая, M2 и M4 – микробиологическая; ФМ2 и ФМ4 – фито-микробиологическая; цифра 2 или 4 означает дозу гранулята, %.

Note (here and below in figures and tables): remediation type: T2 and T4 – technical, M2 and M4 – microbial, PhM2 and PhM4 – phytomicrobial; the number 2 or 4 indicates granulate content, %.

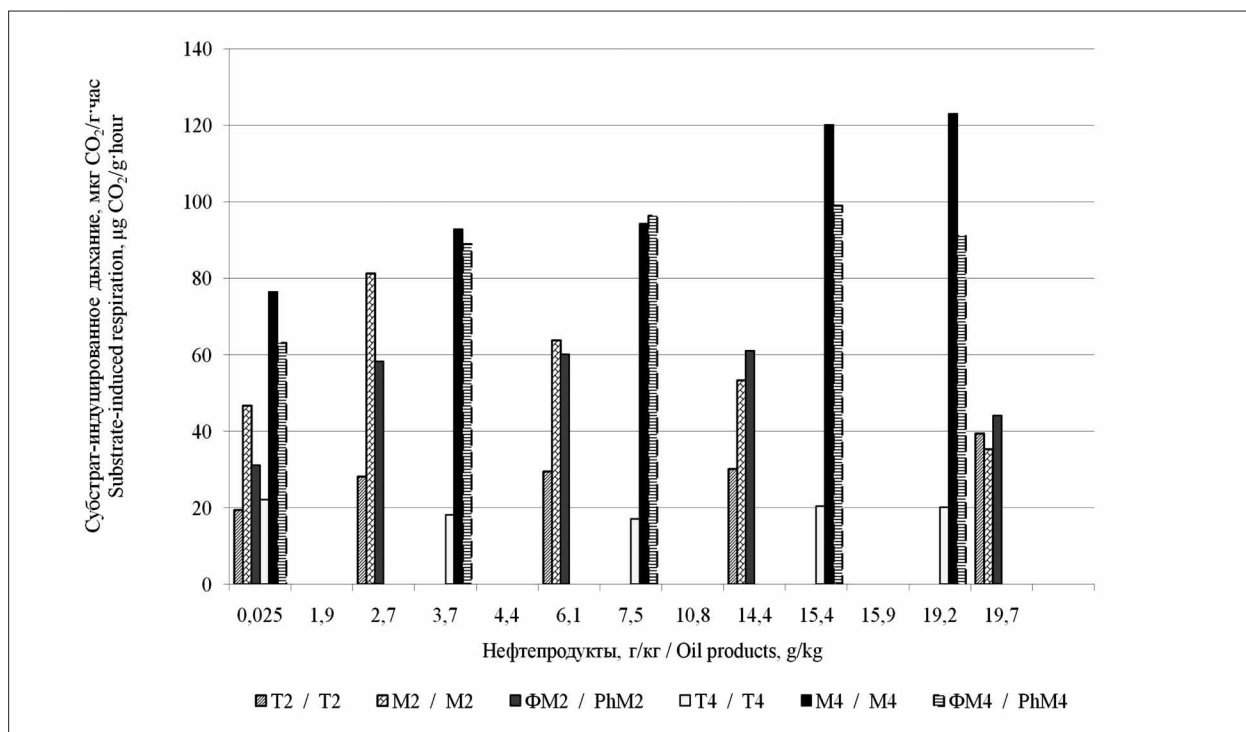


Рис. 2. Влияние дозы гранулята и концентрации нефтепродуктов на субстрат-индуцированное дыхание почвы при её рекультивации

Fig. 2. Effect of granulate and oil products concentration on substrate-induced soil respiration during remediation

ФМ4 при выращивании растений значения $V_{\text{сид}}$ были ниже, чем в опыте М4.

Коэффициент микробного дыхания (Q_r) рассматривается как интегральный показатель, отражающий эколого-физиологическое состояние микробного сообщества, позволяющий оценить степень климатических или антропогенных воздействий на почву. Установлено, что значения Q_r естественных почвенных ценозов располагаются в интервале 0,1–0,2, а значения выше 0,3 свидетельствуют об интенсификации минерализации органического вещества. Чем выше значение Q_r , тем менее устойчива система почвенного микробного сообщества. Величины Q_r , приближающиеся к 1,0 и выше, указывают, что почва испытывает неблагоприятные воздействия [1, 13].

Состояние микробных сообществ почвенных образцов после опытов по технической рекультивации зависело от начального содержания поллютанта. Вариант В3 опыта Т2, варианты В2–В4 опыта Т4 характеризовались повышенной интенсивностью метаболических процессов. В опытах по биологической рекультивации снижение устойчивости почвенных микроорганизмов было отмечено в варианте В3 опыта ФМ4, В4 опытов М2, ФМ2 и ФМ4. В других вариантах проведённых опытов значения Q_r были ниже 0,31, что свидетельствует о «благополучном» состоянии микробного пула загрязнённых нефтью почвенных образцов (табл. 4). В вариантах В3 и В4 опыта ФМ4 были зарегистрированы самые высокие значения Q_r , что, вероятно является результатом взаимодействия почвенной микробиоты и выращиваемых растений.

Таким образом, внесение гранулята в загрязнённую серую лесную почву в большинстве случаев способствовало повышению стабильности сообщества почвенных микроорганизмов. В опытах М2 и М4 было зарегистрировано наиболее стабильное состояние микробного сообщества загрязнённой нефтью почвы (табл. 4).

Интенсивность окисления НП в почве зависела от их начального содержания, дозы внесённых ОСВ, метода рекультивации и изменялась в вариантах В1, В2, В3 и В4 в интервале 32–44 %, 17–69 %, 21–79 % и 8–55 %, соответственно (рис. 3).

В опытах с 4 % гранулята положительный эффект был отмечен при всех испытанных концентрациях НП. Причём в вариантах В2–В4 опыта ФМ4 он был в 2,6–6,3 раза выше, чем в опыте Т4 и в 1,3–1,5 раза выше, чем в опыте М4.

Сравнение интенсивности окисления НП в опытах с разным содержанием гранулята продемонстрировало, что при его концентрации 2 % происходит более активная деструкция загрязнителя. При этом, в опыте М2 в вариантах В3 и В4, содержащих 14,4 и 19,7 г/кг НП, интенсивность их деструкции была на 41 и 33 % выше, чем в опыте Т2 и на 14 и 8 % выше, чем в опыте ФМ2.

Сравнение уровня эмиссии CO_2 (рис. 1) и эффективности деструкции НП (рис. 3) показало, что в условиях микробиологической рекультивации внесение 2 % гранулята обеспечивает максимальное снижение концентрации поллютанта при наименьшей эмиссии CO_2 . Использование более высокой дозы гранулята в большинстве случаев замедляло процесс разложения поллютанта, эмиссия CO_2 при этом была значительно выше.

Заключение

Добавление в загрязнённую нефтью серую лесную почву гранулированного ОСВ в дозе 2 и 4 % усиливало интенсивность базального дыхания. Наибольшая стимуляция $V_{\text{базал}}$ происходила при внесении 4 % гранулята, при этом максимальная эмиссия CO_2 наблюдалась в опытах по фито-микробиологической рекультивации.

Характер субстрат-индуцированного дыхания зависел от подхода к рекультивации, дозы гранулята и уровня исходного загрязне-

Таблица 4 / Table 4
Коэффициент микробного дыхания загрязнённой нефтью почвы при рекультивации
Microbial respiration rate of oil-contaminated soil during remediation

| Варианты Variants | Опыты / Experiments | | | | | |
|----------------------|---------------------|---------|------------|---------|---------|------------|
| | Т2 / T2 | М2 / M2 | ФМ2 / PhM2 | Т4 / T4 | М4 / M4 | ФМ4 / PhM4 |
| В1 | 0,22 | 0,11 | 0,18 | 0,29 | 0,15 | 0,28 |
| В2 | 0,28 | 0,14 | 0,15 | 0,36 | 0,20 | 0,30 |
| В3 | 0,37 | 0,25 | 0,29 | 0,37 | 0,30 | 0,58 |
| В4 | 0,30 | 0,44 | 0,40 | 0,36 | 0,28 | 0,56 |

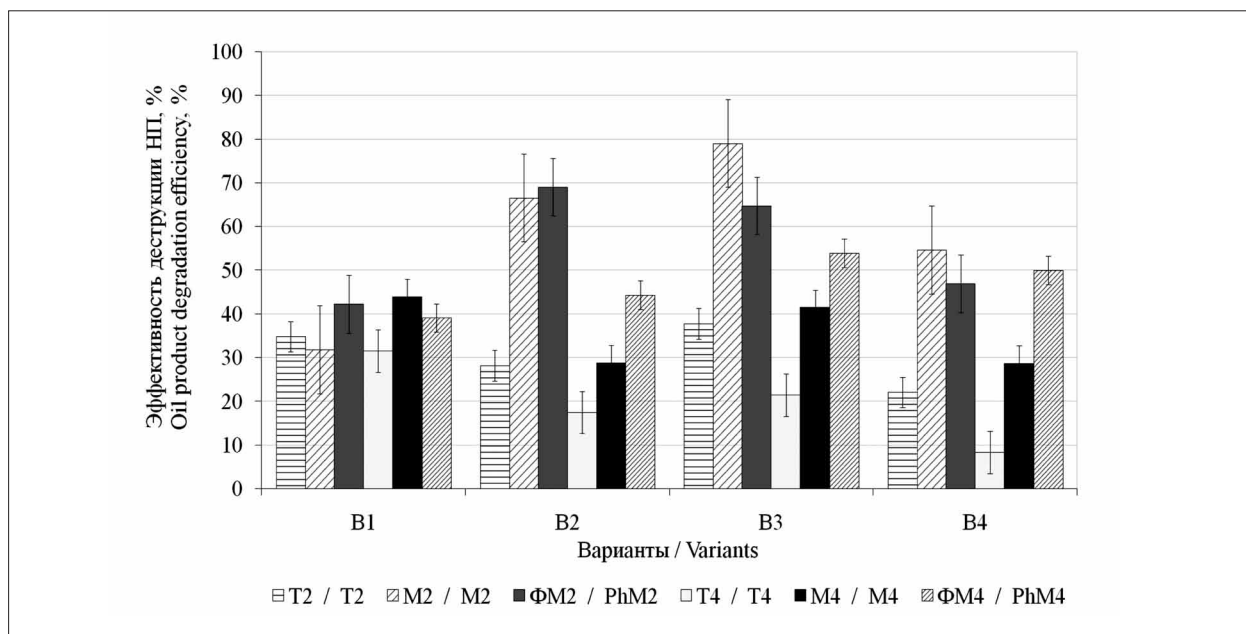


Рис. 3. Влияние дозы гранулята и концентрации нефтепродуктов (НП) на эффективность их деструкции при технической, микробиологической и фито-микробиологической рекультивации (% от начального содержания НП)
Fig. 3. Effect of granulate and oil product concentration on their degradation efficiency during technical, microbiological and phyto-microbiological remediation (% of oil product initial concentration)

ния. По абсолютным показателям в опытах по микробиологической рекультивации $V_{сид.}$ была выше, чем в соответствующих вариантах опытов по фито-микробиологической рекультивации. В опытах по технической рекультивации $V_{сид.}$ закономерно была значительно ниже, чем в опытах с гранулятом.

При выращивании растений на нефтезагрязнённых почвах с гранулятом в большинстве случаев микробный пул был менее стабилен, чем в опытах по микробиологической рекультивации.

Внесение гранулята в почвенные образцы, содержащие до 3,7 г/кг НП, не приводило к достоверной интенсификации деструкционных процессов. При более высоких концентрациях НП наибольшая эффективность их разложения была отмечена в опыте по микробиологической рекультивации при содержании 2 % гранулята (опыт М2). В опытах М2, ФМ2 и ФМ4 в вариантах, содержащих более 19,0 г/кг НП, эффективность их деструкции имела сопоставимые значения.

Соотнесение результатов деструкции НП и эмиссии CO_2 при использовании разных доз гранулированного ОСВ показывает, что при концентрации поллютанта в почве выше 3,7 г/кг внесение 2 % гранулята обеспечивает наибольшую скорость их разложения при наименьшей интенсивности образования

углекислого газа. Выращивание смеси высших растений (*Secale cereale* и *Vicia sativa*) при рекультивации на нефтезагрязнённой почве с гранулятом не увеличивало скорость окисления НП.

С точки зрения повышения активности микробного пула, ускорения деструкции НП в загрязнённой нефтью серой лесной почве и минимизации выбросов CO_2 в атмосферу при проведении биологической рекультивации целесообразно использовать термически обработанный гранулированный осадок муниципальных сточных вод в концентрации 2 %.

Литература

1. Благодатская Е.В., Ананьева Н.Д. Оценка устойчивости микробных сообществ в процессе разложения поллютантов в почве // Почвоведение. 1996. № 11. С. 1341–1346.
2. Петров А.М., Вершинин А.А., Каримуллин Л.К., Акайкин Д.В., Тарасов О.Ю. Динамика эколого-биологических характеристик дерново-подзолистых почв в условиях длительного воздействия нефтяного загрязнения // Почвоведение. 2016. № 7. С. 848–856. doi: 10.7868/S0032180X16050130
3. Hund K., Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes // Chemosphere. 1994. V. 28. No. 3. P. 477–490. doi: 10.1016/0045-6535(94)90292-5

4. Коршунова Т.Ю., Искужина М.Г., Кузина Е.В., Мухаматдырова С.Р., Рамеев Т.В. Оценка влияния различных загрязнителей на рост и развитие растений-ремедиантов // *Экобиотех.* 2023. Т. 6. № 3. С. 156–165. doi: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165

5. Ибрагимова Т.М., Мамедова П.Ш., Бабаев Э.Р., Кахраманова К.Р., Алмамедова А.Э. Биотехнологический способ очистки нефтезагрязненных почв // *Мир нефтепродуктов.* 2022. № 2. С. 20–23. doi: 10.32758/2782-3040-2022-0-2-20-23

6. Arystanova Sh.E., Naekova S.K. The study of relationships between associative microorganisms-decomposers and plants // *Modern Science.* 2017. No. 2. P. 21–23.

7. Лямзин В.И., Бухарина И.Л., Здобяхина О.В., Исупова А.А. Влияние высших растений в консорциуме с микроорганизмами на агрохимические показатели при биоремедиации нефтезагрязнённых земель // *Теоретическая и прикладная экология.* 2022. № 4. С. 166–171. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-166-171

8. Утомбаева А.А., Петров А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В., Вершинин А.А., Иванов Д.В., Шагидуллин Р.Р. Влияние гранулята осадка сточных вод на характеристики серой лесной почвы и продуктивность растений // *Российский журнал прикладной экологии.* 2023. № 1. С. 52–60. doi: 10.24852/2441-7374.2023.1.52.60

9. Утомбаева А.А., Кузнецова Т.В., Вершинин А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Петров А.М. Эффективность применения осадка городских сточных вод при рекультивации нефтезагрязнённой серой лесной почвы // *Вестник НВГУ.* 2023. № 3. С. 113–126. doi: 10.36906/2311-4444/23-3/10

10. Утомбаева А.А., Вершинин А.А., Зайнулгабидинов Э.Р., Петров А.М. Дыхательная активность и фитопродуктивность загрязненной нефтью серой лесной почвы в зависимости от подхода к рекультивации // *Известия КГТУ.* 2024. № 73. С. 36–50. doi: 10.46845/1997-3071-2024-73-36-50

11. Вершинин А.А., Петров А.М., Каримуллин Л.К., Игнатъев Ю.А. Влияние нефтяного загрязнения на эколого-биологическое состояние различных типов почв // *Вестник Казанского технологического университета.* 2012. Т. 15. № 8. С. 207–211.

12. Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Орлинский Д.Б., Мякшина Т.Н. Методические аспекты определения скорости субстрат-индуцированного дыхания почвенных микроорганизмов // *Почвоведение.* 1993. № 11. С. 72–77.

13. Anderson T.-H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO₂ (q_{CO_2}) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils // *Soil Biol. Biochem.* 1993. V. 25. No. 3. P. 393–395. doi: 10.1016/0038-0717(93)90140-7

14. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publ., 1988. P. 20–27.

15. Калькулятор размера эффекта / Калькулятор величины d-Коэна [Электронный ресурс] <https://www.easycalculation.com/ru/statistics/effect-size.php> (Дата обращения: 12.08.2024).

16. Виноградов Д.В., Макарова М.П., Зубкова Т.В. Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур // *Теоретическая и прикладная экология.* 2023. № 1. С. 93–100. doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100

17. Вершинин А.А., Каримуллин Л.К., Петров А.М., Кузнецова Т.В. Влияние фиторекультивационных мероприятий на активность микробного сообщества нефтезагрязнённой аллювиальной дерновой почвы // *Российский журнал прикладной экологии.* 2021. № 1. С. 52–58. doi: 10.24411/-7374-2020-10041

18. Киреева Н.А., Водопьянов В.В., Мифтахова А.М. Биологическая активность нефтезагрязнённых почв. Уфа: Гилем, 2001. 376 с.

19. Соколова Л.Г., Зорина С.Ю., Белоусова Е.Н., Поморцев А.В., Дорофеев Н.В. Эмиссия CO₂ из почвы при введении краткосрочной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья // *Почвоведение.* 2021. № 10. С. 1262–1273. doi: 10.31857/S0032180X21100117

20. Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Сушко С.В. Микробные показатели городских почв и их роль в оценке экосистемных сервисов (обзор) // *Почвоведение.* 2021. № 10. С. 1231–1246. doi: 10.31857/S0032180X21100038

21. Терехова В.А., Прудникова Е.В., Кулачкова С.А., Горленко М.В., Учанов П.В., Сушко С.В., Ананьева Н.Д. Микробиологические показатели агродерново-подзолистых почв различной гумусированности при внесении тяжёлых металлов и углеродосодержащих препаратов // *Почвоведение.* 2021. № 3. С. 372–384. doi: 10.31857/S0032180X21030151

22. Wardle D.A., Parkinson D. Interactions between microclimatic variables and soil microbial biomass // *Biol. Fertil. Soils.* 1990. V. 9. P. 273–280. doi: 10.1007/BF00336239

References

1. Blagodatskaya E.V., Anan'eva N.D. Assessment of the resistance of soil microbial communities to pollutants // *Pochvovedenie.* 1996. No. 11. P. 1344–1346 (in Russian).

2. Petrov A.M., Vershinin A.A., Karimullin L.K., Akaykin D.V., Tarasov O.Yu. Dynamics of ecological and biological characteristics of soddy-podzolic soils under long-term oil pollution // *Pochvovedenie.* 2016. No. 7. P. 848–856 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X16050130

3. Hund K., Schenk B. The microbial respiration quotient as indicator for bioremediation processes // *Chemosphere.* 1994. V. 28. No. 3. P. 477–490. doi: 10.1016/0045-6535(94)90292-5

4. Korshunova T.Yu., Iskuzhina M.G., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Rameev T.V. Evaluation of the influence of various pollutants on the growth and development of remediant plants // *Ecobiotech.* 2023. V. 6. No. 3.

P. 156–165 (in Russian). doi: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165

5. Ibragimova T.M., Mamedova P.Sh., Babaev E.R., Kakhramanova K.R., Almamedova A.E. Biotechnological method of cleaning oil-contaminated soils // World of petroleum products. 2022. No. 2. P. 20–23 (in Russian). doi: 10.32758/2782-3040-2022-0-2-20-23

6. Arystanova Sh.E., Naekova S.K. The study of relationships between associative microorganisms-decomposers and plants // Modern Science. 2017. No. 2. P. 24–23.

7. Lyamzin V.I., Buharina I.L., Zdobiyahina O.V., Isupova A.A. Influence of plants in consortium with microorganisms on agrochemical indicators of oil-contaminated soils // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 166–171 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-166-171

8. Utombaeva A.A., Petrov A.M., Zaynulgabidinov E.R., Kuznetsova T.V., Vershinin A.A., Ivanov D.V., Shagidullin R.R. Effect of sewage sludge granulate on gray forest soil characteristics and plant productivity // Russian Journal of Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 52–60 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.52.60

9. Utombaeva A.A., Kuznetsova T.V., Vershinin A.A., Zainulgabidinov E.R., Petrov A.M. Efficiency of application of municipal wastewater sludge during reclamation of oily gray forest soil // Bulletin of Nizhnevartovsk State University. 2023. No. 3. P. 113–126 (in Russian). doi: 10.36906/2311-4444/23-3/10

10. Utombaeva A.A., Vershinin A.A., Zaynulgabidinov E.R., Petrov A.M. Respiratory activity and phytoproductivity of oil-contaminated gray forest soil depending on remediation approach // Izvestia KSTU. 2024. No. 73. P. 36–50 (in Russian). doi: 10.46845/1997-3071-2024-73-36-50

11. Vershinin A.A., Petrov A.M., Karimullin L.K., Ignatiev Yu.A. The impact of oil pollution on the ecological and biological state of different types of soils // Herald of Kazan Technological University. 2012. V. 15. No. 8. P. 207–211 (in Russian).

12. Ananeva N.D., Blagodatskaya E.V., Orlinsky D.B., Myakshina T.N. Methodical aspects of determining substrate-induced respiration of microorganisms // Pochvovedenie. 1993. No. 11. P. 72–77 (in Russian).

13. Anderson T.-H., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO₂ (q_{CO_2}) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH,

on the microbial biomass of forest soils // Soil Biol. Biochem. 1993. V. 25. No. 3. P. 393–395. doi: 10.1016/0038-0717(93)90140-7

14. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral sciences. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates Publ., 1988. P. 20–27.

15. Effect size calculator / Cohen's d calculator [Internet resource] <https://www.easycalculation.com/ru/statistics/effect-size.php> (Accessed: 12.08.2024).

16. Vinogradov D.V., Makarova M.P., Zubkova T.V. The use of fertilizer mixtures based on sewage sludge and zeolite in oilseed agrocenoses // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-093-100

17. Vershinin A.A., Karimullin L.K., Petrov A.M., Kuznetsova T.V. Influence of phytorecultivation measures on the activity of microbial community of oil-contaminated alluvial soddy soil // Russian Journal of Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 52–58 (in Russian). doi: 10.24411/-7374-2020-10041

18. Kireeva N.A., Vodopyanov V.V., Miftakhova A.M. Biological activity of oil-contaminated soils. Ufa: Gilem, 2001. 376 p. (in Russian).

19. Sokolova L.G., Zorina S.Yu., Belousova E.N., Pomortsev A.V., Dorofeev N.V. CO₂ emission from soil in case of the short-term green manure crops into the fallow fields in the conditions of the Cis-Baikal forest-steppe zone // Pochvovedenie. 2021. No. 10. P. 1262–1273 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21100117

20. Ananeva N.D., Ivashchenko K.V., Sushko S.V. Microbial indicators of urban soils and their role in the assessment of ecosystem services: a review // Pochvovedenie. 2021. No. 10. P. 1231–1246 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21100038

21. Terekhova V.A., Prudnikova E.V., Kulachkova S.A., Gorlenko M.V., Uchanov P.V., Sushko S.V., Ananeva N.D. Microbiological indicators of heavy metals and carbon-containing preparations applied to agrosoddy-podzolic soils differing in humus content // Pochvovedenie. 2021. No. 3. P. 372–384 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X21030151

22. Wardle D.A., Parkinson D. Interactions between microclimatic variables and soil microbial biomass // Biol. Fertil. Soils. 1990. V. 9. P. 273–280. doi: 10.1007/BF00336239

Bioaccumulation and biochemical effects of diesel on Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819

© 2026. E. N. Skuratovskaya¹ ORCID: 0000-0003-4501-5065, S. V. Alyomov¹ ORCID: 0000-0002-3374-0027

T. B. Sigacheva¹ ORCID: 0000-0003-3125-898X, A. V. Serbina^{1,2} ORCID: 0009-0002-1819-6550

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

²Sevastopol State University,
33, Universitetskaya St., Sevastopol, Russia, 299053,
e-mail: sigacheva.t@ibss-ras.ru

Petroleum hydrocarbons' pollution of the aquatic environment is a serious ecological problem. This requires a detailed study of their accumulation in the tissues of aquatic organisms and identification of informative biomarkers to assess the animals' functional state under oil pollution. The aim of the work was to study diesel (DF) effect on the bioaccumulation, prooxidant-antioxidant system (level of oxidized proteins and lipid peroxidation, antioxidant enzyme (superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) activities) and aminotransferase (aspartate aminotransferase, alanine aminotransferase) activities in the *Mytilus galloprovincialis* hepatopancreas after five days' experiment. It was shown that hydrocarbon content in mussels' hepatopancreas in the control, I (0.5 mg/L DF) and II (1 mg/L DF) experimental groups were 0.01, 0.10 and 1.43 mg/g dry weight, respectively. The level of lipid peroxidation in I and II experimental groups was significantly higher (+59 % and +95 %, respectively) as compared to the control ($p < 0.05$). The levels of neutral aldehydes from both experimental groups and basic aldehydes from II group significantly increased (+59 %, +47 %, 52 %, respectively) as compared to the control ($p < 0.05$). SOD activity in II group mussels was significantly higher compared to the control (+30 %) and I group (+45 %) ($p < 0.05$). Contrastingly, CAT activity in II group mollusks was significantly lower as compared to the control (-125 %) and I group (-114 %) ($p < 0.05$). Aminotransferase activities did not differ in the control and the experimental groups. Thus, it was determined, that parameters of prooxidant-antioxidant system demonstrate high sensitivity to DF and can be used as biomarkers for assessing the functional state of mollusks in oil polluted environment.

Keywords: diesel, mussel *Mytilus galloprovincialis*, hepatopancreas, parameters of prooxidant-antioxidant system, activity of aminotransferases.

УДК [594.124-143.7:577.12/.15]:665.75

Биоаккумуляция и биохимические эффекты дизельного топлива на организм средиземноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819

© 2026. Е. Н. Скуратовская¹, к. б. н., в. н. с., С. В. Алёмов¹, к. б. н., в. н. с.,

Т. Б. Сигачева¹, к. б. н., с. н. с., А. В. Сербина^{1,2}, вед. инженер, магистрант,

¹Федеральный исследовательский центр

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

²Севастопольский государственный университет,
299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33,

e-mail: sigacheva.t@ibss-ras.ru

Загрязнение водоёмов нефтяными углеводородами является серьёзной экологической проблемой и требует детального изучения вопросов их накопления в тканях гидробионтов и выявления биомаркеров, информативных для оценки функционального состояния животных в условиях нефтяного загрязнения. Цель работы – изучение влияния дизельного топлива (ДТ) в концентрациях 0,5 и 1 мг/л на биоаккумуляцию, параметры прооксидантно-антиоксидантной системы (уровень окислительной модификации белков и перекисного окисления липидов,

активность антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы (СОД), каталазы (КАТ)) и активности аминотрансфераз (аспаратаминотрансферазы, аланинаминотрансферазы) в гепатопанкреасе мидии *Mytilus galloprovincialis* после пяти дней экспозиции. Результаты исследований позволили установить, что концентрация углеводов в гепатопанкреасе моллюсков из контроля, I и II экспериментальных групп составляла 0,01, 0,10 и 1,43 мг/г сухой массы, соответственно. Уровень перекисного окисления липидов был достоверно выше в гепатопанкреасе мидий при концентрациях ДТ 0,5 и 1 мг/л (+59 %, +95 %, соответственно) по сравнению с контрольной группой ($p < 0,05$). Уровень альдегидов нейтрального характера в обеих экспериментальных группах и альдегидов основного характера во II группе был достоверно выше (+59 %, +47 %, 52 %, соответственно) значений соответствующих показателей в контроле ($p < 0,05$). Активность СОД в гепатопанкреасе мидий из II группы была значительно выше по сравнению с контролем (+30 %) и I группой (+45 %) ($p < 0,05$). В то же время активность КАТ была достоверно ниже у моллюсков из II группы по сравнению с аналогичным параметром у особей из контроля (-125 %) и I группы (-114 %) ($p < 0,05$). Активность аминотрансфераз не отличалась в контрольной и опытных группах. Таким образом, установлена высокая чувствительность показателей прооксидантно-антиоксидантной системы гепатопанкреаса *M. galloprovincialis* к нефтяным углеводородам, что позволяет рекомендовать их в качестве релевантных биомаркеров для оценки функционального состояния моллюсков в условиях нефтяного загрязнения.

Ключевые слова: дизельное топливо, мидия *Mytilus galloprovincialis*, гепатопанкреас, параметры прооксидантно-антиоксидантной системы, активность аминотрансфераз.

Petroleum hydrocarbons (PHs) pollution of the aquatic environment poses a serious ecological problem [1–3]. According to various estimates, approximately from 0.5 to 11 million tons of oil and oil products flow into the World Ocean every year. Oil and its products enter the marine environment through natural seepage from oil reservoirs, extraction, transportation and accidents. They can persist in the marine environment from a few days to 10 years or more, negatively affecting hydrobionts [4, 5].

The problem of oil pollution in Russia has become particularly relevant and significant after the accident of two tankers in the Kerch Strait in December 2024. According to emergency services, the total volume of oil products spilled was approximately 4000 tons. This accident defined the necessity for long-term regular monitoring of marine coastal ecosystems and studies of the biota's response to oil pollution in the region [6].

Almost all PHs are toxic to aquatic organisms, and some of them can accumulate in tissues and organs and be transmitted through food chains. The level of hydrobionts' intoxication by PHs depends on many factors: the concentration and duration of exposure, environmental temperature, physiological peculiarities of the organisms such as size, age, sex. In this regard a wide range of reactions can be identified at different levels of biological organization: from molecular to population and even ecosystem level [4, 7–13].

Therefore, it is significantly important to study PHs effect on molecular (biochemical) markers of hydrobionts. They reflect the effects of major metabolic processes at the cellular level and are considered to be “early warning” signals that can potentially detect impacts on target biota before they are observed at the population, community, or ecosystem level. Therefore, the use of biomarkers can provide crucial evidence

for understanding the relationship between stressors and impacts on coastal resources, as well as for preventing the detrimental effects of pollution on ecosystem structure and functioning. In this regard, the most informative molecular biomarkers are the indicators of the oxidative stress and antioxidant protection, biotransformation enzyme activities as well as the functional state parameters [7, 9, 10, 13–15].

To make the assessment of contaminated marine environment, the bivalves of genus *Mytilus* are most often applied. Their choice is due to abundance, wide geographical distribution, sedentary habits, high survival rate, and toxin resistance to many types of contaminants. Thus, *Mytilus* parameters are commonly used as biomarkers to estimate marine environment polluted with different chemicals [9, 10, 15–18].

In water bodies hydrobionts are generally exposed to multicomponents' PHs including various types of light and heavy fuel. Toxicity effects of these mixtures are usually higher as compared to the individual PHs. Hence, studying the PHs' biological effects in the experiments is of utmost importance for extrapolating the results obtained to the natural habitats of hydrobionts to assess their status as well as the environment state [8–11, 15].

Thus, the aim of the work was to study the bioaccumulation of diesel in hepatopancreas of *Mytilus galloprovincialis* and its effects on some biochemical parameters to determine the mechanisms of the metabolism rearrangement, as well as the adaptive reactions when exposed to the pollutants.

Material and methods of research

Sampling. Mollusks were sampled between the spawning seasons from the collectors in the

mussel farm in Karantinnaya Bay (the Black Sea, Sevastopol) in July.

Experimental design. One-sized mussels with an average shell length of 55.6 ± 0.62 mm were selected for the experiment. Mollusks were placed in glass tanks to acclimatize to the laboratory conditions for 7 days before the experiment at 20–22 °C. The mussels were not fed to avoid the specific effect of food [9]. Diesel concentrations at which DF affect the mussels in tanks were 0.5 mg/L (10 MPC) (I experimental group) and 1 mg/L (20 MPC) (II experimental group). The control samples were kept in clean sea water. Water was changed every 24 h during the exposure. After five days' exposure the samples were taken for chemical and biochemical analyses. Fifteen individuals from each group were taken for biochemical analyses, and 3 samples from each treatment were used for chemical analysis.

To conduct the experiment, DF "Summer", commonly used for marine transport in Sevastopol coastal waters, was added to glass tanks with filtrated marine water. DF concentrations were chosen because in summer in some Sevastopol areas DF contents might reach 0.5 mg/L and was registered even higher [19].

Chemical analysis. We assess the PHs concentration in mussels' hepatopancreas by gas-chromatographic method. All measurements were carried out on the "Kristall 5000.2" (Russia) gas chromatograph with a flame ionization detector in the Scientific and Educational center for collective use "Spectrometry and chromatography" of IBSS. The samples were prepared in accordance with [20]. Hepatopancreas of 3 individuals from each group were homogenized with sodium sulfate and extracted three times with hexane. To separate polar compounds the extracts were passed through Al_2O_3 -filled glass column. The samples were concentrated to 1 mL at room temperature. Quantitative determination of the total PHs' content was carried out using the absolute calibration FID method with PHs' mixture prepared by the gravimetric method. To separate the PHs' mixture, standard sample ASTM D2887 Reference Gas Oil (SUPELCO, USA) was used. N-alkanes content was determined by using standard sample of paraffin PHs in hexane with 200 μ g/mL explosive concentration of each component (SUPELCO, USA). The PHs and n-alkanes concentrations were calculated by using absolute calibration and percentage normalization. To identify petroleum and biogenic hydrocarbons, the diagnostic index (carbon preference index (CPI)) was applied.

For allochthonous biogenic hydrocarbons CPI is more than 1 ($CPI > 1$). For fossil organic matter, as it undergoes catagenetic transformation, the CPI decreases to 1 and below ($CPI \leq 1$) [21].

Biochemical analysis. Since mussel hepatopancreas is the main organ of metabolism and detoxification of a wide range of toxins, it was used for the biochemical analysis. The hepatopancreas of 15 individuals from each group was homogenized and centrifuged at 10 000 g for 15 min at 4 °C in a refrigerated centrifuge MPW-352 (MPW Med. Instruments, Poland). The supernatant obtained by centrifugation was used to determine biochemical parameters.

Superoxide dismutase (SOD) activity was assayed in the nitroblue tetrasolium-phenazine methosulfate – NADH system [22]. Catalase (CAT) activity was measured based on the reaction of interaction between hydroperoxide and molybdate ammonium [23].

The thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) concentration was analyzed by the reaction with thiobarbituric acid [24]. The level of oxidized proteins (neutral aldehydes and ketones, basic aldehydes and ketones) was analyzed through the reaction between oxidized protein amino-acid residues and 2,4-dinitrophenylhydrazine [25].

Aspartate aminotransferase (AST) and alanine aminotransferase (ALT) activities were analyzed through the reaction of oxaloacetate and pyruvate, respectively, with 2,4-dinitrophenylhydrazine [26].

The biochemical parameters were calculated per mg protein. Total soluble protein concentration was quantified by biuret method [27].

Statistical analysis. The results were also processed statistically. Mean values \pm SEM (standard error of the mean) were established. The significance of differences between the samples was assessed using Mann-Whitney U-test. The difference was found great at the significance level $p < 0.05$.

Results and discussion

Survivability of mussels. During the experiment mussels demonstrated high resistance while exposed to DF. No mortality was observed among the control and the exposed mussels.

Bioaccumulation. Hydrocarbons' contents in the control, I and II experimental groups were 0.01, 0.10 and 1.43 mg/g dry weight, respectively. The CPI diagnostic index in the control, I and II experimental groups was 1.83, 0.75, 0.78, respectively (Fig. 1).

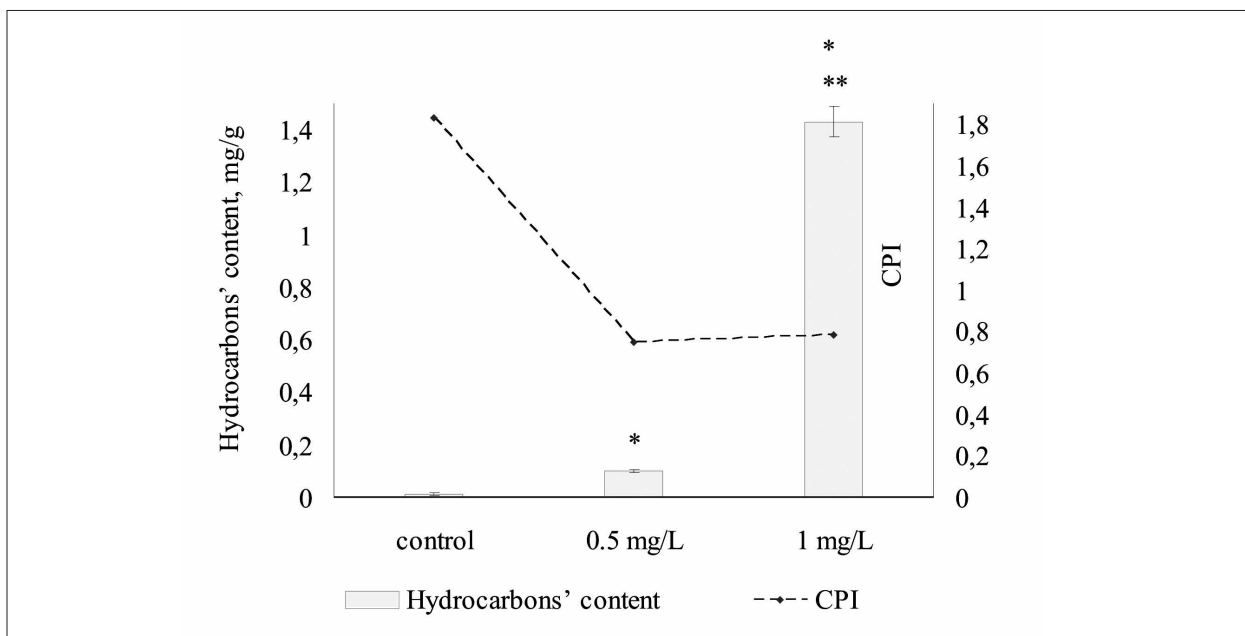


Fig. 1. Hydrocarbons' content in *Mytilus galloprovincialis* hepatopancreas (mg/g dry weight) and CPI index: CPI – carbon preference index; * and ** – statistically significant differences ($p < 0.05$) as compared to the control and to the I experimental group (0.5 mg/L), respectively

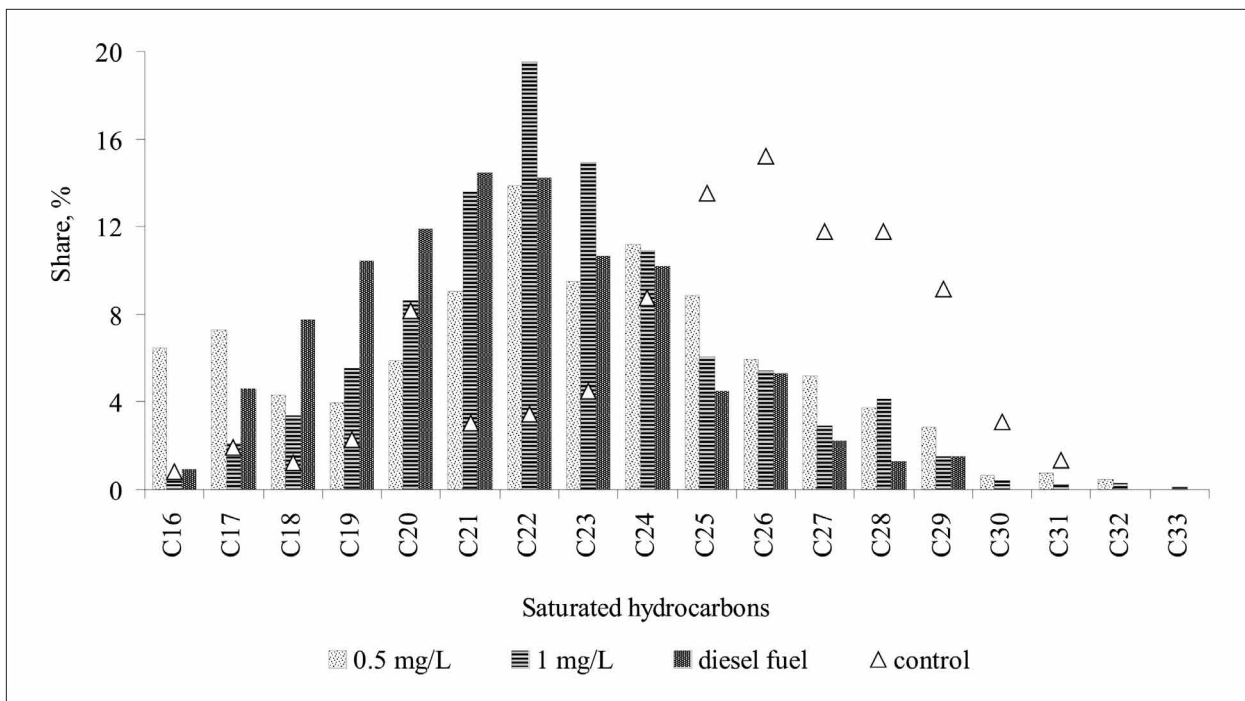


Fig. 2. Composition of n-alkanes in hepatopancreas of *M. galloprovincialis* exposed to diesel

As a result of the chromatographic analysis, the differences in the quantitative content and the qualitative composition of hydrocarbons in the hepatopancreas of mussels from the control and two experimental groups were revealed. In the control group C24-C29 n-alkanes dominated, while in both experimental groups C19-C24 n-alkanes prevailed. C19-C24 n-alkanes predomi-

nance in the hepatopancreas of mussels from the experimental groups was found the same as it was in the diesel composition. It indicated PHs accumulation in mollusks during the filtration process (Fig. 2). This fact is confirmed by the diagnostic index values (CPI < 1) in the I (CPI = 0.75) and the II (CPI = 0.78) experimental groups (Fig. 1).

It should be noted that mollusks from the II group have a significant accumulation of hydrocarbons compared to the I group (more than 14 fold). This may be caused by suppression of filtration activity, disruption of biotransformation and elimination of pollutants under high PHs concentrations in water.

Biochemical response. Diesel changed biochemical parameters in the mussel hepatopancreas. TBARS contents at 0.5 and 1 mg/L were significantly higher (+59 %, +95 %, respectively) as compared to the control ($p < 0.05$) (Fig. 3). The levels of neutral aldehydes (D356) in the hepatopancreas from both experimental groups and basic aldehydes (D430) in specimens from the II group significantly increased (+59 %, +47 %, 52 %, respectively) as compared to the control ($p < 0.05$). No significant differences in neutral (D370) and basic ketone (D530) levels between the control and the experimental groups were found (Fig. 3). SOD activity in mussels from the II group was significantly higher compared to the specimens from the control (+30 %) and the I group (+45 %) ($p < 0.05$). Contrastingly, CAT activity in mollusks from the II group was significantly lower as compared to the control (-125 %) and the I group (-114 %) ($p < 0.05$) (Fig. 3). However, aminotransferase (ALT and AST) activities in the hepatopancreas did not differ in the control and the experimental groups (Fig. 3).

Thus, as seen, DF affected the parameters of prooxidant-antioxidant system in the mussel hepatopancreas. However, more significant changes were detected at 1 mg/L concentration due to high level of PHs accumulation.

Prooxidant-antioxidant system (PAS) parameters are widely used as molecular biomarkers in ecotoxicological studies to assess the state of hydrobionts and quality of aquatic environment. A shift in the prooxidant-antioxidant balance towards an increase in free radical processes causes oxidative stress leading to various pathological conditions and diseases. In particular, lipid peroxidation and protein oxidation are the most significant causes of pathologies. Hence, the universal indicator of oxidative stress is an increase in levels of lipid peroxidation products and oxidized proteins in hydrobionts' tissues. Low-molecular-weight parameters and antioxidant enzyme activities are the sensitive indicators of the organisms' state as well as their habitat. Their changes in hydrobionts affected by the anthropogenic factors are registered in many works [8, 14, 14–17, 27, 28].

The increase in the TBARS content and the levels of neutral (D356) and basic aldehydes

(D430) in the hepatopancreas of mollusks exposed to DF demonstrated the oxidative stress development due to intensification of lipid peroxidation and protein oxidation. At the same time, an increase in SOD activity in the II group may indicate the compensatory adaptive response to high toxicant concentrations in order to decrease the intensity of free radical oxidation. However, CAT values were found decreased in the hepatopancreas of the II group against the background of increase in SOD activity. This fact may indicate inhibition of the enzyme activity due to high levels of PHs' accumulation, as well as imbalance in the SOD and CAT coordinated work.

CAT and SOD is presented in a functional complex in cells. The joint work of these enzymes reliably protects from the toxic effect of superoxide anion radical (O_2^-) and hydrogen peroxide (H_2O_2) high concentrations. However, under stress factors, including oil pollution, reactive oxygen species are synthesized in large concentrations which leads to the inhibition of antioxidant enzymes, an imbalance in the work of enzymatic complexes, and the oxidation of proteins and lipids. Despite its high specificity SOD can interact with H_2O_2 and acts as a prooxidant, initiating the synthesis of O_2^- and hydroxyl radicals (OH^\bullet) when exposed to adverse factors. In this case O_2^- is capable to inhibit CAT, while OH^\bullet initiate the oxidation of proteins and lipids [14, 28, 29].

Available literature data indicate that anthropogenic pollutants under natural and experimental conditions cause changes in the PAS parameters of hydrobionts. At the same time, the PAS reactions are not always clearly expressed and have the same direction. Their vector largely depends on the concentration and characteristics of the acting factor, exposure time, as well as biological features, nutritive status and physiological state of the organism [8, 14, 14, 15, 17, 18, 29]. For example, changes in PAS parameters in the hepatopancreas of Antarctic limpet *Nacella concinna* exposed to DF in concentrations of 0.05 % and 0.1 % were described. SOD, CAT, glutathione-S-transferase and glutathione peroxidase (GPx) activities, as well as lipid peroxidation and protein oxidation levels were studied after 24, 48 and 168 h of exposure. The activity of most enzymes increased with DF exposure and depended on the toxicant concentration. The most pronounced effect was demonstrated by GPx. Its activity significantly increased at the 0.1 % exposure concentration compared to the control. The lipid peroxidation and protein oxidation levels significantly

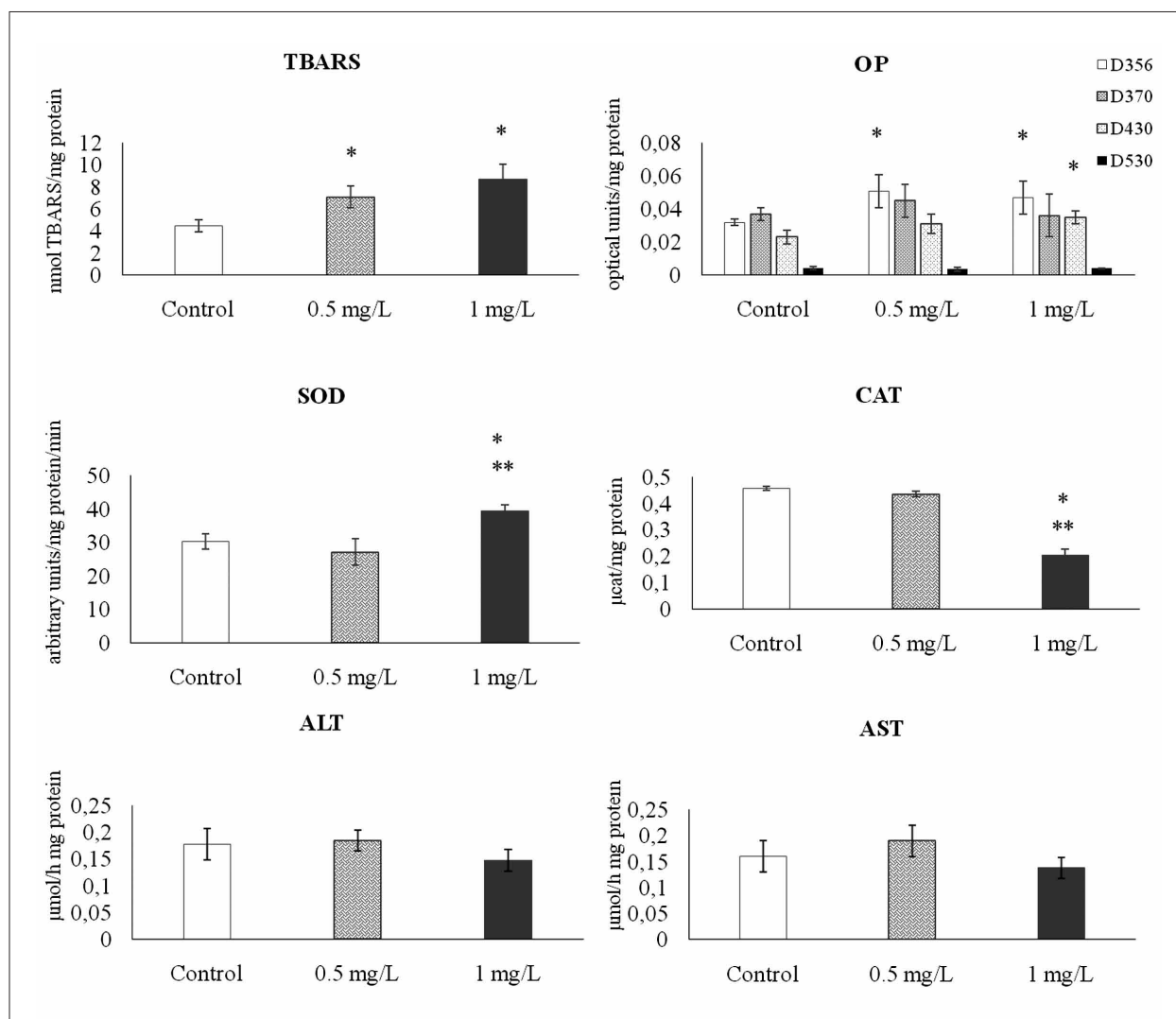


Fig. 3. Biochemical parameters in *M. galloprovincialis* hepatopancreas exposed to diesel: TBARS – thio-barbituric acid reactive substances; OP – oxidized proteins; D356 – neutral aldehydes; D370 – neutral ketones; D430 – basic aldehydes; D530 – basic ketones; SOD – superoxide dismutase; CAT – catalase; ALT – alanine aminotransferase; AST – aspartate aminotransferase; * and ** – statistically significant differences ($p < 0.05$) as compared to the control and to the I experimental group (0.5 mg/L), respectively

increased after 168 h exposure. However, both parameters were higher in the group exposed to tAs for *Mytilus edulis* mussels from the Spain coastal waters, no significant differences in SOD activity were found, while increase in lipid peroxidation was registered in areas affected by oil spills compared to relatively clean waters [27]. It was shown that under chronic oil contamination hepatopancreas cells of *Dreissena polymorpha* and *M. galloprovincialis* demonstrated higher sensitivity to the pollutants and higher level of antioxidant protection as compared to gills. It was recorded a significant increase in CAT, SOD, glutathione reductase activities in the hepatopancreas, as well as in the level of lipid peroxidation in the hepatopancreas and gills in both river (*D. polymorpha*) and marine (*M. gal-*

loprovincialis) mollusks after 28 days of exposure with 50 mg/L mazut [11].

AST and ALT are widely distributed in tissues of aquatic animals and are used for diagnostic of pollutant damage in various tissues. Both aminotransferases activities can be measured to assess the levels of contamination in the environment and pollutant toxicity before the negative effect occurrences. The increase in their activities might be due to generation of suitable substrates for gluconeogenesis and/or energy production that is need for the energy supply of aquatic organisms in stress [16, 30–34].

In our studies, ALT and AST activities did not differ in the control and the experiment. It could indicate that the DF in concentrations

of 0.5 mg/L and 1 mg/L didn't affect the main parts of carbohydrate and protein metabolisms and didn't cause additional energy production. However, other studies demonstrated changes in aminotransferase activities in the tissues of hydrobionts exposed to various toxicants. For example, in the muscle and digestive system of the bay scallop *Placopecten magellanicus* exposed to crude oil in concentrations of 2.50, 5.00 and 10.00 mL/L both aminotransferases rose, though such increase was not concentration and time dependent [32]. But more pronounced changes in aminotransferase activity were observed in the tissues of hydrobionts exposed to heavy metals [30, 34]. It was recorded an increase in the ALT and AST activities in the foot, mantle, and gills of a freshwater mussel *Parreysia rugosa* affected by sublethal concentrations of mercuric chloride [34]. Other authors mentioned that AST activity significantly rose in the homogenate, mitochondrial and cytosolic fractions of snails *Helisoma duryi* and *Lymnaea natalensis* with increasing concentrations of copper (0.01, 0.1 mg/L); however, AST activity decreased at 1 mg/L content. Mitochondrial ALT disappeared at copper ion concentrations of approximately 0.2 mg/L for *L. natalensis* and 1 mg/L for *H. duryi*, possibly indicating mitochondrial degeneration [30].

Conclusions

Under the experimental exposure the mussels demonstrated high resistance to DF. No mortality was observed among the control and the treated specimens. However, petroleum hydrocarbons accumulation was registered in hepatopancreas of the experimental mussels. Significant hydrocarbons' accumulation was detected in II experimental group. This could be caused by suppression of filtration activity, disruption of biotransformation and elimination of pollutants contained high concentrations of petroleum hydrocarbons. DF stimulated oxidative stress by shifting the prooxidant-antioxidant balance towards intensification of lipid peroxidation and protein oxidation in both experimental groups. Toxicants caused SOD activation, and CAT inhibition at 1 mg/L concentration. The prooxidant-antioxidant system parameters demonstrated high sensitivity to DF, and can be used as biomarkers for assessing the functional state of mollusks under oil pollution of the environment. However, the patterns of biomarkers' response are rather complicated because of their dependence on the target organ, dose and

exposure time. Therefore, all characteristics mentioned should be taken into account in marine monitoring programs worldwide.

This work was conducted under financial support of the Russian Academy of Science research grants No. 124022400148-4, 124030100127-7.

The authors thank T.E. Alyomova for help in experimental design.

References

1. Patin S.A. Offshore oil and gas industry: sources and factors of ecological risk // Environmental protection in oil and gas complex. 2015. V. 4. P. 5–12 (in Russian).
2. Adams R.H., Ojeda-Castillo V., Guzmán-Osorio F.J., Álvarez-Coronel G., Domínguez-Rodríguez V.I. Human health risks from fish consumption following a catastrophic gas oil spill in the Chiquito River, Veracruz, Mexico // Environ. Monit. Assess. 2020. V. 192. No. 12. Article No. 783. doi: 10.1007/s10661-020-08742-z
3. Noskova T.V., Panina M.S., Labuzova O.M., Papina T.S., Ilina E.G. Evaluation of anthropogenic load on water bodies within the city limits // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 98–103 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-098-103
4. Barabashin T.O., Korablina I.V., Pavlenko L.F., Skrypnik G.V., Korotkova L.I. Methodological support of pollution monitoring of the Azov and Black seas water bodies // Aquatic Bioresources and Environment. 2018. V. 1. No. 3–4. P. 9–27 (in Russian). doi: 10.47924/2619-1024_2018_1_3-4_9
5. Korshunova T. Yu., Loginov O.N. Oil sludge: conditions of the problem in the Russian Federation and methods to reduce their negative influence on the environment // Ecobiotech. 2019. V. 2. No. 1. P. 75–85 (in Russian). doi: 10.31163/2618-964X-2019-2-1-75-85
6. Soloveva O., Tikhonova E., Zaripova K. Oil pollution in the Kerch Strait after the “Vologoneft” tanker accident in December 2024 // Marine Biological Journal. 2025. V. 10. No. 3. P. 96–104 (in Russian). doi: 10.21072/mbj.2025.10.3.08
7. Karetnikova E.A., Zhirkova A.D. Migration of n-alkanes in diesel fuel along the bacteria – ciliates trophic chain // Izv. Akad. Nauk Ser. Biol. 2005. No. 3. P. 375–379 (in Russian).
8. Aleshko S.A. Impact of petroleum hydrocarbons on marine organisms at molecular level // Izv. TINRO. 2007. V. 148. P. 247–261 (in Russian).
9. Bakhmet I.N., Fokina N.N., Nefyodova Z.A., Ruokolainen T.R., Nemova N.N. Blue mussels *Mytilus edulis* L. in the White Sea as bioindicators under diluted oil impact // Transactions of KarRC RAS. 2012. No. 2. P. 38–46 (in Russian).
10. Skidchenko V.S., Vysotskaya R.U., Nemova N.N. The range of acid deoxyribonuclease isoforms in the tissues

of *Mytilus edulis* mussels in model experiments with petroleum hydrocarbon poisoning // Transactions of KarRC RAS. 2012. No. 2. P. 131–138 (in Russian).

11. Sukharenko E.V., Nedzvetsky V.S., Kyrychenko S.V. Biomarkers of metabolism disturbance in bivalve molluscs induced by environmental pollution with processed by-products of oil // Biosystems Diversity. 2017. V. 25. No. 2. P. 113–118. doi: 10.15421/011717

12. Beirão J., Baillon L., Litt M.A., Langlois V., Purchase C.F. Impact of crude oil and the dispersant Corexit™ EC9500A on capelin (*Mallotus villosus*) embryo development // Mar. Environ. Res. 2019. V. 147. P. 90–100. doi: 10.1016/j.marenvres.2019.04.004

13. Bender M.L., Giebichenstein V., Teisrud R.N., Laurent J., Frantzen M., Meador J.P., Sørensen L., Hansen B.H., Reinardy H.C., Laurel B., Nahrgang J. Combined effects of crude oil exposure and warming on eggs and larvae of an arctic forage fish // Sci. Rep. 2021. V. 11. No. 1. Article No. 8410. doi: 10.1038/s41598-021-87932-2

14. Jiang M., Li L., Li Y., Shen G., Shen X. Oxidative stress in shellfish *Sinonovacula constricta* exposed to the water accommodated fraction of zero sulfur diesel oil and Pinghu crude oil // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2017. V. 73. No. 2. P. 294–300. doi: 10.1007/s00244-017-0391-z

15. Blanco-Rayón E., Guilhermino L., Irazola M., Ivanina A.V., Sokolova I.M., Izagirre U., Marigómez I. The influence of short-term experimental fasting on biomarker responsiveness in oil WAF exposed mussels // Aquat. Toxicol. 2019. V. 206. P. 164–175. doi: 10.1016/j.aquatox.2018.11.016

16. Sigacheva T.B., Chesnokova I.I., Gostyukhina O.L., Kholodkevich S.V., Kuznetsova T.V., Andreenko T.I., Kovrigina N.P., Gavrusheva T.V., Kirin M.P., Kurakin A.S. Assessment of recreational potential of Sevastopol bays using bioindication methods // South of Russia: ecology, development. 2021. V. 16. No. 1. P. 151–167 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2021-1-151-167

17. Vidal-Liñán L., Bellas J., Soriano J.A., Concha-Graña E., Muniategui S., Beiras R. Bioaccumulation of PCB-153 and effects on molecular biomarkers acetylcholinesterase, glutathione-S-transferase and glutathione peroxidase in *Mytilus galloprovincialis* mussels // Environ. Pollut. 2016. V. 214. P. 885–891. doi: 10.1016/j.envpol.2016.04.083

18. González-Fernández C., Albentosa M., Sokolova I. Interactive effects of nutrition, reproductive state and pollution on molecular stress responses of mussels, *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 // Mar. Environ. Res. 2017. V. 131. P. 103–115. doi: 10.1016/j.marenvres.2017.08.011

19. Sanitary and biological studies of the southwestern Crimea coastal waters at the beginning of XXI century / Eds. O.G. Mironov, S.V. Alyomov. Simferopol: IP Arial, 2018. 276 p. (in Russian).

20. Practical guide on chemical analysis of elements of aquatic ecosystems. Priority toxicants in water, bottom

sediments, hydrobionts / Ed. T.O. Barabashin. Rostov-on-Don: Mini Tipe, 2018. 436 p. (in Russian).

21. Khalikov I.S. The use of alkanes as markers of the origin of petroleum products in water bodies // Environmental control systems –2018: reports of the International scientific and technical conference. Sevastopol: Kolorit, 2018. P. 35–36 (in Russian).

22. Nishikimi M., Appaji N., Yagi K. The occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen // Biochem. Biophys. Res. Commun. 1972. V. 46. No. 2. P. 849–854. doi: 10.1016/S0006-291x(72)80218-3

23. Korolyuk M.A., Ivanova L.I., Mayorova I.G., Tokarev V.E. Method for assaying catalase activity // Laboratornoe Delo. 1988. No. 1. P. 16–19 (in Russian).

24. Stalnaya I.D., Garishvili T.G. Method for determination of malonic dialdehyde using thiobarbituric acid // Current Methods in Biochemistry / Ed. V.N. Orechovich. Moskva: Medicine Publ., 1977. P. 66–68 (in Russian).

25. Dubinina E.E., Burmistov S.O., Khodov D.A., Porotov I.G. Oxidative modification of human serum proteins. A method of determining it // Vopr. Med. Khim. 1995. V. 41. No. 1. P. 24–26 (in Russian).

26. Kamyshnikov V.S. Guide on clinical and biochemical studies and laboratory diagnostics. Moskva: MEDpress-inform, 2009. 896 p. (in Russian).

27. Solé M., Porte C., Biosca X., Mitchelmore C.L., Chipman J.K., Livingstone D.R., Albaigés J. Effects of the “Aegean Sea” oil spill on biotransformation enzymes, oxidative stress and DNA-adducts in digestive gland of the mussel (*Mytilus edulis* L.) // Comp. Biochem. Physiol. 1996. V. 113C. No. 2. P. 257–265. doi: 10.1016/0742-8413(95)02095-0

28. Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: an integrated overview // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026

29. Ansaldo M., Najle R., Luquet C.M. Oxidative stress generated by diesel seawater contamination in the digestive gland of the Antarctic limpet *Nacella concinna* // Mar. Environ. Res. 2005. V. 59. No. 4. P. 381–390. doi: 10.1016/j.marenvres.2004.06.003.

30. Masola B., Chibi M., Naik Y.S., Kandare E., Zaranyika M.F. Activities of glutamate dehydrogenase and aspartate and alanine aminotransferases in freshwater snails *Helisoma duryi* and *Lymnaea natalensis* exposed to copper // Biomarkers. 2003. V. 8. No. 1. P. 33–42. doi: 10.1080/13547500210166757

31. Edori O.S., Konne J.L. Biochemical alterations in bay scallops (*Placopecten magellanicus*) exposed to crude oil // World Journal of Pharmaceutical Research. 2015. V. 4. No. 8. P. 2270–2285. doi: 10.13140/RG.2.1.1144.8162

32. El-Khayat H.M.M., Hamid H.A., Gaber H.S., Mahmoud K.M.A., Flefel H.E. Snails and fish as pollu-

tion biomarkers in Lake Manzala and laboratory A: Lake Manzala snails // Fisheries and Aquaculture Journal. 2015. V. 6. No. 4. Article No. 1000153. doi: 10.4172/2150-3508.1000153

33. Malakhova L.V., Skuratovskaya E.N., Malakhova T.V., Lobko V.V. The relationship between integrated biochemical index and content of organochlorine xenobiotics in the liver of the Black Scorpion Fish *Scorpaena porcus*

Linnaeus, 1758, from Sevastopol Bays and Coastal Areas // J. Sib. Fed. Univ. Biol. 2020. V. 13. No. 4. P. 387–409 (in Russian). doi: 10.17516/1997-1389-0335

34. Patel R., Kurhe A. Effects of heavy metals copper and mercury on the biochemical composition and activity pattern of selected enzymes of Molluscs: A Review // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. 2023. V. 19. No. 3. P. 187–198.

Влияние токсикантов анионного типа на состояние тканей гепатопанкреаса живородки речной (*Viviparus viviparus* L.)

© 2026. Т. С. Дроганова¹, ст. преподаватель, А. А. Лазарева¹, магистрант, Л. В. Поликарпова¹, ст. преподаватель, Д. А. Арешидзе², к. б. н., зав. лабораторией, Н. В. Васильев¹, д. х. н., зав. кафедрой,
¹Государственный университет просвещения, 105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 10А, стр. 2,
²«НИИМЧ им. акад. А.П. Авцына» ФГБНУ «РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского», 117418, Россия, г. Москва, ул. Цюрупы, д. 3,
 e-mail: tatyana droganova@gmail.com

Исследовано действие повышенных концентраций экотоксикантов анионного типа (на примере нитрат- и арсенат-анионов) на морфофункциональное состояние ткани и активность кислых фосфатаз (КФ) гепатопанкреаса моллюска живородка речная (*Viviparus viviparus* L.). Изменение удельной активности кислой фосфатазы у моллюсков в тканях гепатопанкреаса свидетельствует о нарушении метаболизма у исследованных животных, что подтверждается при оценке морфофункционального состояния тканей. При действии нитрат-ионов отмечаются сравнительно небольшие фазы повышения и снижения удельной активности КФ (в 1,5 раза по сравнению с контрольными значениями). К 96 часам экспозиции активность фермента остаётся выше контрольных значений. Действие арсенат-ионов приводит к более выраженной патологии тканей и существенному изменению удельной активности фермента, которая не стабилизируется даже через 30 суток после удаления токсиканта из воды. Полученные данные могут быть использованы в эколого-биохимическом мониторинге загрязнений пресных вод.

Ключевые слова: эколого-биохимический мониторинг, гидробионты, живородка речная, кислая фосфатаза, активность ферментов, множественные формы ферментов, нитрат- и арсенат-анионы, морфофункциональное состояние.

Anionic toxicants' effect on *Viviparus viviparus* L. hepatopancreas tissues

© 2026. T. S. Droganova¹ ORCID: 0000-0002-8917-7392, A. A. Lazareva¹ ORCID: 0009-0000-3909-7549,
 L. V. Polikarpova¹ ORCID: 0000-0002-5459-3054, D. A. Areshidze² ORCID: 0000-0003-3006-6281,
 N. V. Vasiliev¹ ORCID: 0000-0002-8215-6687

¹Federal State University of Education, 10A, building 2, Radio St., Moscow, Russia, 105005,

²Avtsyn Research Institute of Human Morphology of Federal state budgetary scientific institution "Petrovsky National Research Centre of Surgery", 3, Tsurypa St., Moscow, Russia, 117418,
 e-mail: tatyana droganova@gmail.com

The effect of elevated concentrations of anionic ecotoxicants (using nitrate and arsenate anions as an example) on the morphofunctional state of tissue and the activity of acid phosphatases (AcP) in the *Viviparus viviparus* L. hepatopancreas was studied. It was found that the phases of AcP activity after exposure to the nitrate and arsenate ions do not coincide with those in the control. Changes in the specific activity of acid phosphatase in the tissues of the hepatopancreas of mollusks were not accompanied by a change in the number of multiple forms and indicated a metabolic disorder in the animals studied. The latter was confirmed by an assessment of the tissues morphofunctional state. When exposed to nitrate anions, there are relatively small phases of increase and decrease in the specific activity of AcP (by 1.5 times compared to the control values). The enzyme activity remains above control values by 96 hours of exposure. Morphological changes are heterogeneous – some epithelial cells are necrotic, in some sites the epithelial cells are hypertrophied, vacuolated, but not destroyed. The exposure to arsenate anions leads to more pronounced tissue pathology (the nuclei of epithelial cells are at different stages of destruction, the tubules are deformed or destroyed, the stroma grows) and a

significant change in enzyme specific activity, which does not stabilize even 30 days after the toxicant removal from the water. The AcP activity in *V. viviparus* can be a marker of toxic effects on living organisms in ecological and biochemical monitoring of freshwater pollution.

Keywords: ecological and biochemical monitoring, aquatic organisms, *Viviparus viviparus*, acid phosphatase, enzyme activity, multiple forms of enzymes, nitrate and arsenate anions, morphofunctional state.

Исследование состояния моллюсков средней полосы под воздействием экотоксикантов достаточно часто осуществлялось ранее на примерах катионов тяжёлых металлов и органических соединений [1–4]. Вместе с тем известно, что загрязнение водоёмов токсикантами анионного типа является не менее серьёзной и частой экологической проблемой. Среди таких анионов наиболее распространена нитрит-нитратная пара, а в некоторых случаях также арсенаты и арсениты. Содержание анионов в воде имеет сезонный характер и зависит от количества осадков и биогеоценотического равновесия [5–7]. Нитрит- и нитрат-ионы являются одним из факторов эвтрофирования водных объектов и превышение их концентраций может отражаться на физиологии, биохимии, морфологии водной биоты, изменять реакцию на другие стрессовые воздействия среды [8, 9]. Концентрация нитрат-ионов в водоёмах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения составляет 45 мг/л согласно СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Известно, что нитрит- и нитрат-ионы действуют на дыхательные пигменты, переносящие кислород (гемоцианин, гемоглобин), преобразуя их в окисленные формы, не способные связывать и транспортировать кислород [10, 11].

Мышьяк присутствует в водных экосистемах как в органической, так и в неорганических формах, которые обладают разной токсичностью для гидробионтов. В подземных и поверхностных водах он преимущественно существует в неорганической форме в виде As(III) (арсенит) и As(V) (арсенат), но в большинстве водных объектов преобладающей формой является арсенатная [12, 13]. Соотношение форм зависит от солёности, окислительно-восстановительного потенциала и биохимических процессов (биометилирование). Предельно допустимая концентрация (ПДК) подвижных форм мышьяка в водоёмах хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения, согласно СанПиН 1.2.3685-21, составляет 0,01 мг/л, что является одним из

наиболее строгих нормативов для неорганических ионов.

Мышьяк поглощается гидробионтами в основном с пищей, и его токсичные неорганические соединения в организме способны связываться с металлотронеин-подобными белками или превращаться в органические формы, которые, как отмечают большинство исследователей, обладают низкой токсичностью и быстро выводятся из организма. Однако, исследования на рыбах *Siganus fuscescens*, *Acanthopagrus schlegeli* показали, что неорганические формы мышьяка биотрансформируются в арсенобеталин, который способствует накоплению общего количества мышьяка в тканях рыб [14, 15]. В литературе отмечено, что соединения As(III) обладают большей токсичностью для гидробионтов, чем соединения As(V), однако пентавалентный мышьяк в организме может превращаться в арсеноксид, имеющий более высокую токсичность. Токсическое действие на организмы обусловлено способностью связываться с SH-группами ферментов, приводя к их инактивации. В частности, ингибируются ДНК-полимераза и ферменты цикла трикарбоновых кислот. Многие авторы отмечают накопление мышьяка в печени и мышцах гидробионтов (морских брюхоногих моллюсков *Littorina littoralis*, *Nucella lapillus*) и промысловых рыб, таких как арктическая треска (*Arctogadus glacialis*), атлантическая треска (*Gadus morhua*), пикша (*Melanogrammus aeglefinus*), морской скорпион (*Myoxocephalus scorpius*), зеркальный памп (*Pampus argenteus*), горбыль (*Otolithes ruber*). Соединения мышьяка способны вызывать деструктивные изменения во внутренних органах рыб [16–19].

При рассмотрении литературных данных можно отметить невысокую изученность действия токсикантов анионного типа на моллюсков, распространённых в пресных водах Евразии, несмотря на их существенный вклад в биоценотические связи.

В связи с этим, целью работы стало изучение действия нитрат- и арсенат-ионов на динамику активности кислой фосфатазы (КФ) и морфофункциональное состояние тканей гепатопанкреаса пресноводных моллюсков живородка речная (*Viviparus viviparus* L.),

широко распространённого в центральной части Евразии вида гидробионтов.

Объекты и методы исследования

Сбор моллюсков *Viviparus viviparus* производился летом-осенью 2023 г. в прибрежной зоне Пестовского водохранилища (Московская область, г. о. Пушкинский, село Тишково, 56°05'11" с. ш., 37°44'20" в. д.). В течение 2-х недель моллюсков содержали в лабораторных аквариумах с постоянной аэрацией, наполненных водой, растениями и микроорганизмами с места сбора; температура поддерживалась близкой к естественной. Далее проводили токсикологический эксперимент. Моллюсков делили на контрольную и опытные группы. Опытные животные содержались в воде с добавлением токсикантов в течение 96 часов, после чего производилась замена воды. Продолжительность опыта составляла 34 суток, в течение которых проводился осмотр животных. Перед началом эксперимента (точка экспозиции 0 суток) 5 особей *Viviparus viviparus* из контрольной группы препарировали и извлекали гепатопанкреас. Для изучения динамики изменения активности ферментов отбор биологического материала у животных контрольной и опытных групп (по 5 особей) производили через 2, 4, 6, 12, 24, 48, 72, 96 часов и 34 суток от начала эксперимента.

Концентрация нитрата натрия (NaNO_3) соответствовала 10 ПДК – 450 мг/л (для NO_3^- ПДК = 45 мг/л в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования); концентрация дигидроарсената натрия (NaH_2AsO_4) соответствовала 5 ПДК – 0,05 мг/л (для As суммарно ПДК = 0,01 мг/л в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования) (СанПиН 1.2.3685-21); животные контрольной группы не подвергались действию токсикантов. Выбор концентрации токсикантов обусловлен целью исследования – опытным путём было установлено, что концентрация, превышающая ПДК в 5–10 раз, является оптимальной для изучения острого воздействия токсикантов (при меньшем содержании действующего вещества может не наблюдаться очевидного результата, а повышенные концентрации зачастую приводят к преждевременной гибели особей) [1].

Полученные образцы тканей использовали для приготовления гистологических препаратов и получения экстрактов водорастворимых белков. Экстракт водорастворимых белков

получали растиранием тканей с порошком кварцевого стекла при охлаждении. В качестве экстрагирующей жидкости использовали 0,5 % раствор Triton X-100, прибавляемый по отношению к навеске ткани в 10-кратном объёме. Выбор Triton X-100 для экстракции белков обусловлен его способностью высвобождать белки (ферменты), прочно связанные с мембранами митохондрий, локализованные внутри лизосом или других клеточных структур. Белковые экстракты очищали центрифугированием в рефрижераторной центрифуге «Eppendorf 5417 R» при 6,700 g и 4 °C в течение 30 минут, затем отделяли супернатант [20].

Биохимическую оценку воздействия проводили путём спектрофотометрического определения активности кислой фосфатазы (КФ) [21] по скорости гидролиза модельного субстрата *n*-нитрофенилфосфата («Sigma», США). За единицу активности фермента принимали такое его количество, которое катализирует превращение одного мкмоль *n*-нитрофенилфосфата за одну минуту. Удельную активность КФ рассчитывали в единицах на 1 мг белка (МЕ/мг белка). Для расчёта удельной активности концентрацию белка в полученных экстрактах определяли по методу Лоури [22].

Белки фракционировали методом диск-электрофореза в колонках ПААГ длиной 8 см по Орнштейну и Девису [23, 24] при температуре 4–6 °C для предотвращения искажения зон разделяемых белков. Концентрация разделяющего геля составляла 7,8 %, а концентрирующего – 4,5 %. Процесс полимеризации занимал 45–60 минут. В качестве электродного буфера использовали 0,05 М Tris-глициновый буфер с pH 8,3.

Обнаружение зон активности КФ проводили по методике Берстона [25], усовершенствованной Лойда и соавторами [26], модифицированной для гелей. Колонку геля промывали дистиллированной водой и помещали в реакционную смесь, содержащую 8 мл 0,2 М ацетатного буфера (pH 4,1) и 1 мл 0,3 %-ного раствора α -нафтилфосфата («Sigma», США) [27]. Смесь тщательно перемешивали и инкубировали в течение 10 минут на водяной бане при 37 °C. Далее приливали 1 мл раствора прочного синего Б (ПСБ, Fast Blue B, «Sigma», США) с концентрацией 2 мг/мл, перемешивали и снова инкубировали на водяной бане до появления на гелевой колонке малиново-красных полос в местах локализации КФ (время инкубации составляло от 5 до 20 мин).

Часть фрагментов ткани гепатопанкреаса и мышц фиксировали в 10 % нейтральном забуференном формалине с дальнейшей проводкой по спиртам возрастающей концентрации (50°, 60°, 70°, 80° и 96°) и ксилолам с последующей заливкой в гистологическую среду «Гистомикс» (БиоВитрум, Россия). Серийные гистологические срезы толщиной 5–6 мкм изготавливали на роторном микротоме Leica SM2010 R (Германия). Окраску гематоксилином и эозином осуществляли по общепринятой методике.

Микроскопию гистологических препаратов проводили на цифровом микроскопе Leica DM 2500 с применением цифровой фотокамеры Leica DFC 290 (Германия). Для микроскопии были использованы окуляры ×10, ×15, объективы ×4, ×10, ×20, ×40, ×100.

Все биохимические исследования проводили в пяти биологических и трёх аналитических повторностях. Результаты представлены в виде «среднее значение ± стандартное отклонение». Статистическую обработку данных проводили при помощи Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Биохимическое исследование. При проведении исследования в обоих случаях отмечалось изменение поведенческих реакций – снижение подвижности, закрытие раковины крышечкой, но не наблюдалась гибель животных.

Активность фермента КФ живородки речной не остаётся постоянной на протяже-

нии эксперимента, как у контрольной, так и у опытной групп исследованных животных вследствие естественных метаболических процессов в организме моллюсков и имеет фазовый характер, который наблюдается и в других случаях при работе с моллюсками [1, 4, 20]. Изменение активности КФ под действием нитрат- и арсенат-ионов приведено на рисунке 1. Оба токсиканта индуцируют отличные от контроля изменения активности почти во всё время проведения эксперимента.

Действие нитрат-ионов в начальные часы экспозиции (2–4 ч) приводит к некоторому снижению активности КФ относительно контрольных значений, далее активность фермента не отличается от контрольных значений. К 48 ч экспозиции отмечается прирост активности фермента в 1,5 раза, после чего отмечено снижение активности (точка 72 ч). Через 96 ч экспозиции активность фермента превышает контрольные значения более, чем в 1,5 раза. Следует отметить, что удаление токсиканта из воды привело к стабилизации активности КФ – через 30 сут удельная активность фермента составила $(1,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ МЕ/мг белка, что сопоставимо с контрольным значением – $(2,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ МЕ/мг белка.

Под действием арсенат-ионов отмечены более существенные повышения и снижения активности КФ, которые не совпадают с таковыми для контрольной группы животных. Максимальные значения активности отмечены в точках экспозиции 2–4 и 48 ч. Через 96 ч от начала эксперимента активность КФ сопоставима с контрольными значениями. Спустя 30 сут

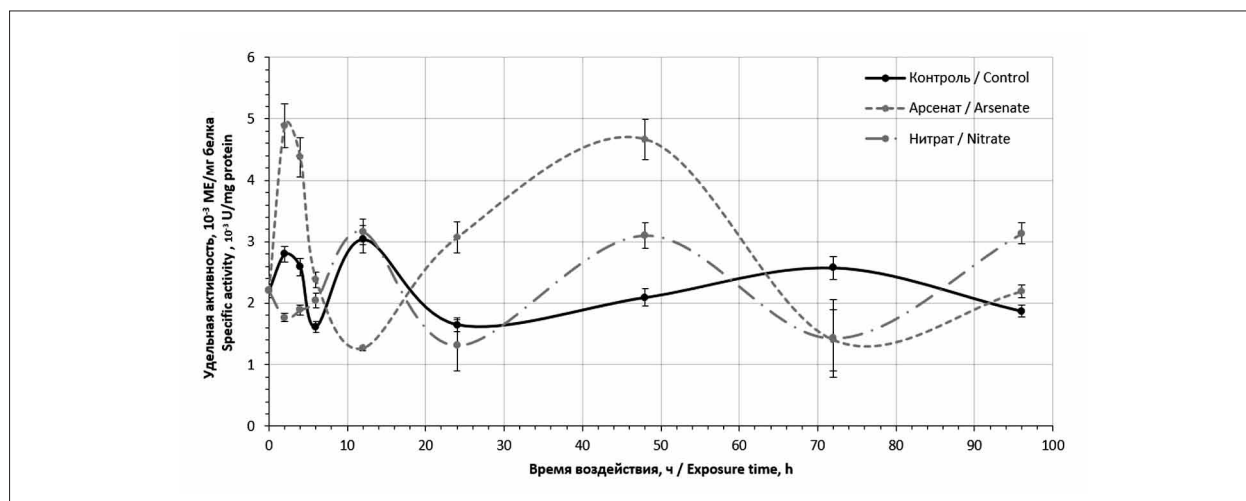


Рис. 1. Изменение удельной активности кислой фосфатазы гепатопанкреаса живородки речной под действием нитрат- и арсенат-ионов

Fig. 1. Specific activity of *Viviparus viviparus* hepatopancreas acid phosphatases exposed to nitrate and arsenate anions

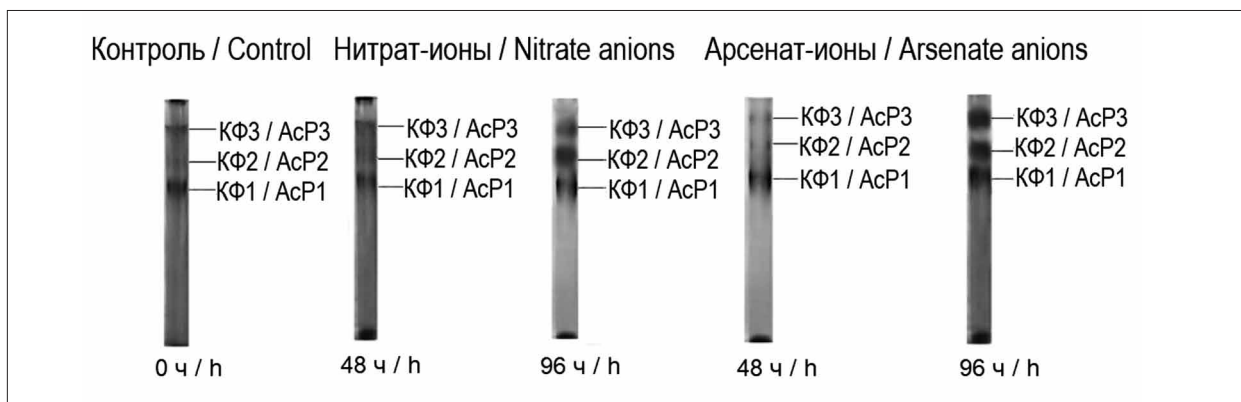


Рис. 2. Энзимограмма множественных форм кислой фосфатазы (КФ) гепатопанкреаса живородки речной под действием нитрат и арсенат-ионов
Fig. 2. Enzymogram of multiple forms of acid phosphatase (AcP) of *V. viviparus* hepatopancreas exposed to nitrate and arsenate anions

Таблица 1 / Table 1

Значения относительной электрофоретической подвижности форм кислой фосфатазы (КФ) под действием нитрат и арсенат-ионов
 Relative electrophoretic mobility values of acid phosphatase (AcP) exposed to nitrate and arsenate anions

| Молекулярная форма КФ Molecular form of AcP | Группа / Group | | |
|--|---------------------|---|---|
| | Контроль Control | Под действием нитрат-ионов Exposed to nitrate anions | Под действием арсенат-ионов Exposed to arsenate anions |
| КФ1 / AcP1 | 0,368 | 0,351 | 0,351 |
| КФ2 / AcP2 | 0,175 | 0,160 | 0,175 |
| КФ3 / AcP3 | 0,123 | 0,125 | 0,120 |

после прекращения токсического воздействия активность фермента вдвое ниже контрольных значений – $(1,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ МЕ/мг белка.

Таким образом, действие нитрат- и арсенат-ионов на фермент обменного комплекса – кислотную фосфатазу в обоих случаях приводит к сдвигу фаз активности, что является проявлением адаптационных процессов. При этом влияние арсенат-иона проявляется более значительно в сравнении с нитрат-ионом. В ряде работ описано, что при действии поллютантов техногенного происхождения и инсектицидов проявлением адаптационных процессов являлось появление новых множественных форм КФ, а также и некоторых других ферментов обменного комплекса [3, 28]. В случае действия изучаемых анионов не было зафиксировано изменения состава множественных форм КФ пищеварительной железы живородки речной (рис. 2). Во всех исследованных образцах выявлены 3 изоформы фермента, со значениями относительной электрофоретической подвижности, приведёнными в таблице 1. Таким образом, регистрирующиеся изменения активности фермента не связаны с индукцией новых изоформ фермента.

Морфофункциональное состояние тканей гепатопанкреаса. Строение гепатопанкреаса контрольной и опытных групп животных представлено на микрофотографии (рис. 3). Гепатопанкреас моллюсков представлен рядом желез (канальцев), разделённых соединительнотканными септами (прослойками). Эпителий желёз простой однорядный однослойный. Чётко дифференцируется базальная мембрана. Дифференцируется 3 типа клеток: пищеварительные (дигестивные), кальциевые и экскреторные клетки. Признаков патологических изменений клеток не наблюдается.

У группы животных, подвергавшихся действию нитрат-ионов, происходит ряд патологических изменений с эпителиоцитами (некроз), однако изменения в строении минимальны, базальная мембрана сохраняется. Имеет место накопительный эффект, который проявился в гибели клеток одновременно. Кроме того, у базальной мембраны сохраняются мелкие клетки, похожие на вновь образовавшиеся и ещё не дифференцированные. Также следует отметить, что в органах этой группы животных отмечается некоторая неоднородность

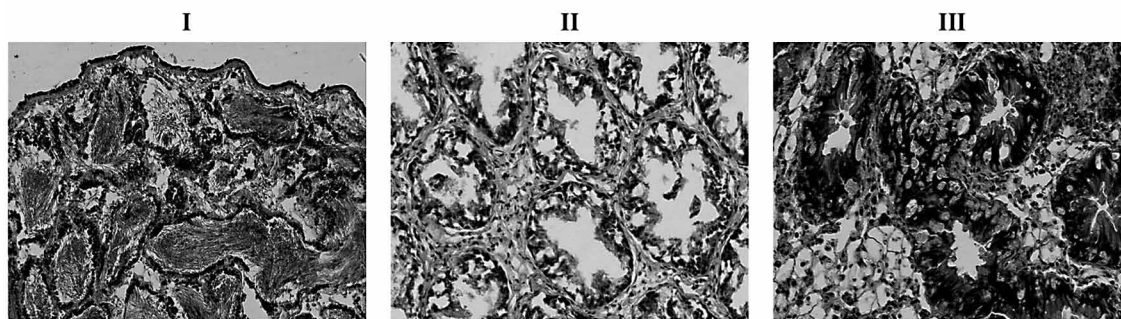


Рис. 3. Клетки гепатопанкреаса *Viviparus viviparus*: I – в норме, $\times 200$; II – под действием нитрат-ионов, $\times 400$; III – под действием арсенат-ионов, $\times 400$; окраска гематоксилином и эозином
Fig. 3. *Viviparus viviparus* hepatopancreas cells: I – control (without exposure), $\times 200$; II – exposed to nitrate ions, $\times 400$; III – exposed to arsenate ions, $\times 400$; stained with hematoxylin and eosin

изменений, встречаются и участки с менее выраженными признаками патологических изменений – эпителиоциты вакуолизированы, гипертрофированы, но не разрушены.

В группе животных, подвергавшихся влиянию арсенат-ионов, наблюдаются значительные изменения. В ряде случаев нарушается целостность базальной мембраны, клетки эпителия не дифференцируются, они патологически гипертрофированы, в $\sim 80\%$ клеток ядро на разных стадиях разрушения, вплоть до полного лизиса, в части клеток наблюдается митоз, а также апоптотические тельца. Некоторые каналцы содержат детрит, т. е. практически разрушены. Неразрушенные каналцы деформированы, клетки вакуолизированы, гипертрофия чаще всего наблюдается в апикальной части. Строма железы разрастается.

Дозозависимого эффекта у моллюсков экспериментальных групп обнаружено не было.

Заключение

Таким образом, активность кислой фосфатазы под воздействием нитрат- и арсенат-анионов характеризуется изменением фазового характера; активность фермента периодически увеличивается, затем снижается, что свидетельствует об интенсивной адаптации биохимических систем животных. При этом изменение активности фермента не связано с изменениями количества изоформ. Это является принципиальным отличием действия изученных токсикантов анионного типа в сравнении с действием катионов тяжёлых металлов и фторсодержащих соединений, описанных в ранних работах, посвящённых биохимическому воздействию экотоксикантов на брюхоногих моллюсков и, в частности, на

моллюска *Viviparus viviparus* L. Необходимо отметить, что в отсутствии новых множественных форм кислой фосфатазы в тканях гепатопанкреаса наблюдаются существенные морфофункциональные изменения. Более значительные структурные перестройки клеток наблюдаются при действии арсенат-ионов в сравнении с таковыми при действии нитрат-ионов.

Литература

1. Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В., Коничев А.С. Белковые спектры печени живородки речной в норме и при интоксикации ионами свинца (II) // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 109–113. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-109-113
2. Попов А.П., Коничев А.С., Цветков И.Л. Влияние токсичных соединений техногенного происхождения на активность и множественные формы кислой ДНКазы живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) // Прикладная биохимия и микробиология. 2003. Т. 39. № 5. С. 518–523.
3. Tsvetkov I.L., Popov A.P., Konichev A.S. Acid phosphatase complex from the freshwater snail *Viviparus viviparus* L. under standard conditions and intoxication by cadmium ions // Biochemistry (Moscow). 2003. V. 68. No. 12. P. 1327–1334 (in Russian). doi: 10.1023/B:BIRY.0000011654.71353.2a
4. Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В., Тишина Е.А., Анка М., Петренко Д.Б., Васильев Н.В. Влияние ионов Zn^{2+} на активность кислых нуклеаз пресноводных моллюсков // Известия РАН. Серия биологическая. 2022. № 2. С. 219–224. doi: 10.31857/S1026347022020056
5. Namasivayam C., Sangeetha D., Gunasekaran R. Removal of anions, heavy metals, organics and dyes from water by adsorption onto a new activated carbon from jatropha husk, an agro-industrial solid waste // Process Safety and Environmental Protection. 2007. V. 85. No. 2. P. 181–184. doi: 10.1205/psep05002

6. Saha A., Ahweyevu J.O., Baker E.M., Penn D. II, Saha S. Assessment of common anion and cation contaminants in surface waterbodies in Statesboro, Georgia, USA // *Earth Syst. Environ.* 2022. V. 6. P. 617–630. doi: 10.1007/s41748-022-00300-6
7. Зыкова Е.Л., Довнар А.К., Филиппова В.А., Лысенкова А.В. Санитарно-химическая оценка содержания анионов-токсикантов в природных водах Гомельской области // *Проблемы здоровья и экологии.* 2014. № 4 (42). С. 125–129. doi: 10.51523/2708-6011.2014-11-4-24
8. Solving the Nitrate Problem: progress in research and development. London: MAFF Publications, 37 p. [Электронный ресурс] <https://archive.org/details/b32226998/mode/2up> (Дата обращения: 21.04.2026).
9. Галиулин Р.В., Башкин В.Н., Галиулина Р.А. Канцерогенный риск загрязнения нитратами водных экосистем // *Проблемы анализа риска.* 2016. Т. 13. № 3. С. 30–33. doi: 10.32686/1812-5220-2016-13-3-30-33
10. Camargo J.A., Alonso A., Salamanca A. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates // *Chemosphere.* 2005. V. 58. No. 9. P. 1255–1267. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.10.044
11. Cheng S.-Y., Chen J.-C. Study on the oxyhemocyanin, deoxyhemocyanin, oxygen affinity and acid-base balance of *Marsupenaeus japonicus* following exposure to combined elevated nitrite and nitrate // *Aquat. Toxicol.* 2002. V. 61. No. 3-4. P. 181–193. doi: 10.1016/s0166-445x(02)00053-x
12. Чарыкова М.В., Кривовичев В.Г., Деммайер В. Физико-химические условия образования минералов мышьяка в приповерхностных обстановках // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география.* 2008. Выпуск 4. С. 62–81.
13. Moore J.W., Ramamoorthy S. Heavy Metals in Natural Waters. Springer New York, 1984. 268 p. doi: 10.1007/978-1-4612-5210-8
14. Zhang W., Chen L., Zhou Y., Wu Y., Zhang L. Biotransformation of inorganic arsenic in a marine herbivorous fish *Siganus fuscescens* after dietborne exposure // *Chemosphere.* 2016. V. 147. P. 297–304. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.12.121
15. Zhang W., Guo Z., Zhou Y., Chen L., Zhang L. Comparative contribution of trophic transfer and biotransformation on arsenobetaine bioaccumulation in two marine fish // *Aquat. Toxicol.* 2016. V. 179. P. 65–71. doi: 10.1016/j.aquatox.2016.08.017
16. Альберт А. Избирательная токсичность. Физико-химические основы терапии / под ред. В.А. Филова. В 2 томах. Т. 1. М.: Медицина, 1989. 400 с.
17. Альберт А. Избирательная токсичность. Физико-химические основы терапии / под ред. В.А. Филова. В 2 томах. Т. 2. М.: Медицина, 1989. 432 с.
18. Agah H., Leermakers M., Elskens M., Fatemi S.M.R., Baeyens W. Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf // *Environ. Monit. Assess.* 2009. V. 157. No. 1-4. P. 499–514. doi: 10.1007/s10661-008-0551-8
19. Новиков М.А., Горбачева Е.А., Лаптева А.М. Содержание мышьяка в промысловых рыбах Баренцева моря (по многолетним данным) // *Известия ТИНРО.* 2021. Т. 201. № 4. С. 833–844. doi: 10.26428/1606-9919-2021-201-833-844
20. Дроганова Т.С., Конишев А.С., Петренко Д.Б., Поликарпова Л.В., Цветков И.Л. Влияние фторида натрия и фторуксусной кислоты на активность кислой ДНКазы, кислой фосфатазы и спектр растворимых белков гепатопанкреаса живородки речной // *Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки.* 2017. № 4. С. 36–45. doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-36-45
21. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of p-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // *Am. J. Clin. Pathol.* 1947. V. 17. No. 7. P. 571–574. doi: 10.1093/ajcp/17.7_ts.571
22. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin phenol reagent // *J. Biol. Chem.* 1951. V. 193. No. 1. P. 265–275.
23. Ornstein L. Disc electrophoresis. I. Background and theory // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1964. V. 121. P. 321–349. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14207.x
24. Davis B.J. Disc electrophoresis – II. Method and application to human serum proteins // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1964. V. 121. No. 2. P. 404–427. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14213x
25. Burstone M.S. Enzyme histochemistry, and Its Application in the Study of Neoplasms. Academic Press, 1962. 621 p.
26. Lojda Z., Gossrau R., Schiebler T.H. Enzyme Histochemistry. A laboratory Manual. Springer, 1979. 344 p. doi: 10.1007/978-3-642-67234-7
27. Babson A.L., Read P.A. A new assay for prostatic acid phosphatase in serum // *American Journal of Clinical Pathology.* 1959. V. 32. No. 1. P. 88–91. doi: 10.1093/ajcp/32.1_ts.88
28. Тишина Е.А., Поликарпова Л.В., Дроганова Т.С., Лазарева А.А., Васильев Н.В. Множественные формы ферментативных систем брюхоногих моллюсков при действии пиретроидов // *Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: Сборник материалов VIII Всероссийской конференции по водной экотоксикологии, посвящённой 85-летию со дня рождения Бориса Александровича Флёрова.* Борок: Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН, 2023. С. 109–111.

References

1. Droganova T.S., Polikarpova L.V., Konichev A.S. River snail liver protein spectrum in normal conditions and when intoxicated with lead (II) ions // *Theoretical and Ap-*

- plied Ecology. 2019. No. 3. P. 109–113 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-109-113
2. Popov A.P., Konichev A.S., Tsvetkov I.L. Effect of toxic industrial pollutants on the activity and isoforms of acid dnase in the freshwater snail *Viviparus viviparus* L. // Applied Biochemistry and Microbiology. 2003. V. 39. No. 5. P. 518–523 (in Russian).
3. Tsvetkov I.L., Popov A.P., Konichev A.S. Acid phosphatase complex from the freshwater snail *Viviparus viviparus* L. under standard conditions and intoxication by cadmium ions // Biochemistry (Moscow). 2003. V. 68. No. 12. P. 1327–1334 (in Russian). doi: 10.1023/B:BIRY.0000011654.71353.2a
4. Droганова T.S., Polikarpova L.V., Tishina E.A., Anka M., Petrenko D.B., Vasiliev N.V. Effect of Zn²⁺ ions on acidic nuclease activity of freshwater molluscs // Biology Bulletin. 2022. No. 2. P. 219–224 (in Russian). doi:10.31857/S1026347022020056
5. Namasivayam C., Sangeetha D., Gunasekaran R. Removal of anions, heavy metals, organics and dyes from water by adsorption onto a new activated carbon from jatropha husk, an agro-industrial solid waste // Process Safety and Environmental Protection. 2007. V. 85. No. 2. P. 181–184. doi: 10.1205/psep05002
6. Saha A., Ahweyevu J.O., Baker E.M., Penn D. II, Saha S. Assessment of common anion and cation contaminants in surface waterbodies in Statesboro, Georgia, USA // Earth Syst. Environ. 2022. V. 6. P. 617–630. doi: 10.1007/s41748-022-00300-6
7. Zykova E.L., Dovnar A.K., Filippova V.A., Lysenkova A.V. The sanitary and chemical assessment of the contents of toxic anions in natural waters of Gomel region // Health and Ecology Issues. 2014. No. 4. P. 125–129 (in Russian). doi:10.51523/2708-6011.2014-11-4-24
8. Solving the Nitrate Problem: progress in research and development. London: MAFF Publications, 37 p. [Internet resource] <https://archive.org/details/b32226998/mode/2up> (Accessed: 21.04.2026).
9. Galiulin R.V., Bashkin V.N., Galiulina R.A. Cancerogenic risk of nitrate contamination of water ecosystems // Issues of Risk Analysis. 2016. V. 13. No. 3. P. 30–33 (in Russian). doi: 10.32686/1812-5220-2016-13-3-30-33
10. Camargo J.A., Alonso A., Salamanca A. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review with new data for freshwater invertebrates // Chemosphere. 2005. V. 58. No. 9. P. 1255–1267. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.10.044
11. Cheng S.-Y., Chen J.-C. Study on the oxyhemocyanin, deoxyhemocyanin, oxygen affinity and acid-base balance of *Marsupenaeus japonicus* following exposure to combined elevated nitrite and nitrate // Aquat. Toxicol. 2002. V. 61. No. 3-4. P. 181–193. doi: 10.1016/s0166-445x(02)00053-x
12. Charykova M.V., Krivovichev V.G., Depmeier W. Physico-chemical conditions of selenium mineral formation in near-surface environmental // Vestnik Sankt-Petersburgskogo universiteta. Seriya 7: Geologiya, geografiya. 2008. No. 4. P. 62–81 (in Russian).
13. Moore J.W., Ramamoorthy S. Heavy Metals in Natural Waters. Springer New York, 1984. 268 p. doi: 10.1007/978-1-4612-5210-8
14. Zhang W., Chen L., Zhou Y., Wu Y., Zhang L. Biotransformation of inorganic arsenic in a marine herbivorous fish *Siganus fuscescens* after dietborne exposure // Chemosphere. 2016. V. 147. P. 297–304. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.12.121
15. Zhang W., Guo Z., Zhou Y., Chen L., Zhang L. Comparative contribution of trophic transfer and biotransformation on arsenobetaine bioaccumulation in two marine fish // Aquat. Toxicol. 2016. V. 179. P. 65–71. doi: 10.1016/j.aquatox.2016.08.017
16. Albert A. Selective toxicity. The physico-chemical basis of therapy / Ed. V.A. Filov. In 2 volumes. V. 1. Moskva: Meditsina, 1989. 400 p. (in Russian).
17. Albert A. Selective toxicity. The physico-chemical basis of therapy / Ed. V.A. Filov. In 2 volumes. V. 2. Moskva: Meditsina, 1989. 432 p. (in Russian).
18. Agah H., Leermakers M., Elskens M., Fatemi S.M.R., Baeyens W. Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf // Environ. Monit. Assess. 2009. V. 157. No. 1-4. P. 499–514. doi: 10.1007/s10661-008-0551-8
19. Novikov M.A., Gorbacheva E.A., Lapteva A.M. Arsenic content in commercial fish of the Barents Sea (according to long-term data) // Izv. TINRO. 2021. V. 201. No. 3. P. 833–844 (in Russian). doi: 10.26428/1606-9919-2021-201-833-844
20. Droганова T., Konichev A., Petrenko D., Polikarpova L., Tsvetkov I. Influence of sodium fluoride and fluoroacetic acid on the activity of acidic DNase, acid phosphatase and the spectrum of soluble proteins of the freshwater snail, *Viviparus viviparus* L. // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki. 2017. No. 4. P. 36–45 (in Russian). doi: 10.18384/2310-7189-2017-4-36-45
21. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of p-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // Am. J. Clin. Pathol. 1947. V. 17. No. 7. P. 571–574. doi: 10.1093/ajcp/17.7_ts.571
22. Lowry O.H., Rosebrough N.J., Farr A.L., Randall R.J. Protein measurement with the Folin phenol reagent // J. Biol. Chem. 1951. V. 193. No. 1. P. 265–275.
23. Ornstein L. Disc electrophoresis. I. Background and theory // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1964. V. 121. P. 321–349. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14207.x
24. Davis B.J. Disc electrophoresis – II. Method and application to human serum proteins // Ann. N.Y. Acad. Sci. 1964. V. 121. No. 2. P. 404–427. doi: 10.1111/j.1749-6632.1964.tb14213x
25. Burstone M.S. Enzyme histochemistry, and Its Application in the Study of Neoplasms. Academic Press, 1962. 621 p.

26. Lojda Z., Gossrau R., Schiebler T.H. Enzyme Histochemistry. A laboratory Manual. Springer, 1979. 344 p. doi: 10.1007/978-3-642-67234-7

27. Babson A.L., Read P.A. A new assay for prostatic acid phosphatase in serum // American Journal of Clinical Pathology. 1959. V. 32. No. 1. P. 88–91. doi: 10.1093/ajcp/32.1_ts.88

28. Tishina E.A., Polikarpova L.V., Droганova T.S., Lazareva A.A., Vasilev N.V. Mnozhestvennye

formy fermentativnykh sistem bryukhonogikh mollyuskov pri deystvii piretroidov // Antropogennoe vliyanie na vodnye organizmy i ekosistemy: Sbornik materialov VIII Vserossiyskoy konferentsii po vodnoy ekotoksikologii, posvyashchennoy 85-letiyu so dnya rozhdeniya Borisa Aleksandrovicha Flerova. Borok: Papanin Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, 2023. P. 109–111 (in Russian).

Профили антибиотикорезистентности стрептомицетов из разных почв Вятского Прикамья

© 2026. И. Г. Широких^{1,2}, д. б. н., зав. лабораторией, в. н. с.,
Н. А. Боков^{1,3}, аспирант, м. н. с., А. А. Широких^{1,3}, д. б. н., в. н. с.,
Т. Я. Ашихмина^{2,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого,
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

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: irgenal@mail.ru

Распространение антибиотикорезистентности среди бактерий, вызывающих инфекции, создаёт риск потери эффективности антибиотиков как лекарственных средств. Решению этой глобальной проблемы здравоохранения и ветеринарии могут способствовать новые знания о резистоме бактерий в почве, как природном резервуаре генов устойчивости к антибиотикам, где благодаря горизонтальному переносу генов может происходить передача признака в клинически значимые патогенные виды. В сравнительном аспекте охарактеризованы профили фенотипической устойчивости типичных почвенных бактерий – актиномицетов – к определённому набору антибиотиков из разных классов и различных механизмов действия. В общей сложности определены профили устойчивости 152 природных изолятов, полученных из почв разных районов Кировской области. Источником для их изоляции служили пробы почв, отобранных на особо охраняемых природных территориях (природные экосистемы) и на участках, типизирующих различные виды хозяйственной деятельности (трансформированные экосистемы). Из каждой почвенной пробы анализировали равные по объёму выборки изолятов с признаками, характерными для рода *Streptomyces*. С помощью методов многомерной статистики показано, что уровень резистентности стрептомицетов к каждому из семи антибиотиков (налидиксовая кислота, тетрациклин, полимиксин, триметоприм, линкомицин, амоксициллин и стрептомицин) значимо ($p < 0,05$) определяют как географический район выделения штамма, так и тип экосистемы (природная или трансформированная). В качестве общей закономерности на обследованной территории отмечена высокая эффективность стрептомицина и тетрациклина, и низкая чувствительность стрептомицетов к налидиксовой кислоте. Природные лесные, как и антропогенно трансформированные экосистемы, обогащены штаммами стрептомицетов со множественной устойчивостью к антибиотикам. Практическое значение полученных результатов для экологии и мониторинга заключается в статистически доказанной возможности использования устойчивости почвенных стрептомицетов в качестве индикатора антропогенной нагрузки на почву.

Ключевые слова: антибиотики, устойчивость, почвенный резистом, *Streptomyces*, природная экосистема, хозяйственное использование, статистический анализ.

Antibiotic resistance profiles of streptomycetes from different soils of the Vyatka Prikamye

© 2026. I. G. Shirokikh^{1,2}, ORCID: 0000-0002-3319-2729, N. A. Bokov^{1,3}, ORCID: 0000-0002-1000-1192,
A. A. Shirokikh^{1,3}, ORCID: 0000-0002-7808-0376, T. Ya. Ashikhmina^{2,3}, ORCID: 0000-0003-4919-0047

¹Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

²Institute of Biology of 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: irgenal@mail.ru

The spread of antibiotic resistance among infection-causing bacteria poses the risk of losing the effectiveness of antibiotics as medicines. New knowledge about bacterial resistance in soil, as a natural reservoir of antibiotic resistance genes, can contribute to solving this global health and veterinary problem, where the trait can be transferred to clinically significant pathogenic species due to horizontal gene transfer. The profiles of the phenotypic resistance of typical soil bacteria, actinomycetes, to a specific set of antibiotics from different classes and different mechanisms of action are characterized in a comparative aspect. In total, the stability profiles of 152 natural isolates obtained from soils of different districts of the Kirov region were determined. The source for their isolation was soil samples taken from specially protected natural areas (natural ecosystems) and sites typifying various types of economic activity (transformed ecosystems). Equal samples of isolates with features characteristic of the genus *Streptomyces* were analyzed from each soil sample. Using multidimensional statistical methods, it was shown that the level of *Streptomyces* resistance to each of the seven antibiotics (nalidixic acid, tetracycline, polymyxin, trimethoprim, lincomycin, amoxicillin, and streptomycin) significantly ($p < 0.05$) determines both the geographical area of strain isolation and the type of ecosystem (natural or transformed). A general pattern in the surveyed area was the high efficacy of streptomycin and tetracycline, and the low *Streptomyces* low sensitivity to nalidixic acid. Natural forest ecosystems, as well as economically transformed ecosystems, are enriched with *Streptomyces* strains with multiple antibiotic resistance. The practical significance of the results obtained for ecology and monitoring lies in the statistically proven possibility of using the stability of soil *Streptomyces* as an indicator of anthropogenic load on the soil.

Keywords: antibiotics, resistance, soil resistance, *Streptomyces*, natural ecosystem, economic use, statistical analysis.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в числе десяти главных угроз общественному здоровью назвала в 2023 г. устойчивость к противомикробным препаратам [1]. По оценкам ВОЗ, ежегодно в мире около 5 млн человек умирают от устойчивых к антибиотикам возбудителей инфекций. Значительную роль в распространении антибиотикорезистентности играет широкое и часто неконтролируемое использование антибиотиков в медицине и ветеринарии. Однако исследования последних десятилетий убедительно показали, что содействовать распространению и эволюции устойчивости к антибиотикам в микробиомах могут и другие причины, обусловленные хозяйственной деятельностью человека. Известно, что тяжёлые металлы (ТМ), отличные от антибиотиков противомикробные препараты и другие загрязнители, связанные с сельским хозяйством и аквакультурой, внося свой вклад в ухудшение состояния окружающей среды (ОС), способны стимулировать процесс совместного отбора, косвенно способствуя развитию устойчивости к антибиотикам [2–5]. Ряд механизмов одновременного отбора по нескольким признакам, ведущего к появлению в микробных популяциях перекрёстной резистентности, был рассмотрен в работах [3, 6, 7]. Установлено, что явление перекрёстной устойчивости определяется наличием двух (или более) связанных детерминант резистентности, то есть расположенных рядом друг с другом генов, отвечающих за две (или более) формы резистентности, на одном мобильном генетическом элементе [6]. Из-за близкого расположения, детерминирующие устойчивость к антибиотикам и ТМ гены могут передаваться клетке-реципиенту вместе, как это было показано в работе [7], в которой идёт

речь о горизонтальном переносе генов в водной среде. Что касается почвенной среды, то работы, посвящённые перекрёстной устойчивости к антибиотикам и загрязнению металлами, в доступной нам литературе единичны [5, 8, 9]. Остаются ограниченными наши знания также о природном фоне распространения генов устойчивости к антибиотикам в различных почвах (почвенном резистоме) [10, 11]. Поэтому сокращение использования противомикробных препаратов в здравоохранении само по себе вряд ли сможет предотвратить распространение устойчивости к антибиотикам как в клинических условиях, так и в окружающей природной среде [12]. Наряду с мерами, направленными на борьбу с чрезмерным и неправильным использованием противомикробных лекарственных препаратов, исключением антибиотиков из списка кормовых добавок для животных в качестве стимуляторов роста, необходим поиск других путей к замедлению развития этой опасной тенденции [13]. Исследования распространения устойчивости к антибиотикам в почвенных микробиомах из природной и антропогенно трансформированной ОС приобретают в связи с этим всё большую актуальность.

Почва, как природная среда обитания микроорганизмов, представляет собой резервуар устойчивых форм и содержит соответствующую генетическую информацию об устойчивости к антибиотикам. Согласно концепции резистома, конкретным микробиомам присущи определённые наборы факторов резистентности [14].

Высокие уровни устойчивости, как средство самозащиты от разрушения собственными антибиотиками, проявляют мицелиальные прокариоты – актиномицеты, лидирующие

среди известных в настоящее время промышленных продуцентов антибиотиков. Значительный вклад актиномицетов в формирование почвенного резистоста отмечали многие исследователи [11, 14, 15].

Цель настоящей работы – сравнительная характеристика профиля антибиотикорезистентности природных изолятов рода *Streptomyces* из почв природных и антропогенно трансформированных экосистем в географически разобщённых районах Кировской области.

Объекты и методы исследований

Отбор почвенных проб для исследования проводили на территории Кировской области, расположенной на северо-западной окраине Вятско-Камской провинции подзоны дерново-подзолистых почв южной тайги. Характеристика объектов исследования представлена в таблице.

Пробы почв отбирали как на природных территориях (природные экосистемы), так и на участках, типизирующих различные виды хозяйственной деятельности: деревообрабатывающее производство, сбор и хранение отходов химического комбината и твёрдых коммунальных отходов, здравоохранение (трансформированные экосистемы). Площадь участков отбора проб составляла в каждом случае около 100 м². Из верхнего почвенного слоя (0–10 см) на каждом участке методом конверта отбирали по пять индивидуальных проб (массой не менее 100 г) и объединяли их в один смешанный образец, из которого отбирали навески для микробиологического посева.

Выделение и культивирование микроорганизмов. Актиномицеты выделяли в чистые культуры при посеве из разведений почвенных суспензий на казеин-глицериновый агар (КГА) [16]. Для ограничения роста немисцелиальных бактерий перед посевом почву прогревали при 70 °С в течение 4 ч. Чашки с посевами инкубировали при 28 °С в течение двух-трёх недель, после чего из выросших колоний разных морфотипов проводили выделение культур для дальнейшей работы. Изоляты хранили в пробирках на скошенном овсяном агаре при 4 °С. О принадлежности выделенных культур к роду *Streptomyces* судили по характерным культуральным и морфологическим признакам: нефрагментированный воздушный и субстратный мицелий, длинные цепочки спор в воздушном мицелии, которые исследовали с помощью микроскопа Leica DM 2500 (Carl

Zeiss, Германия). Из каждого образца почвы выделяли не менее 15 культур с типичными для рода *Streptomyces* признаками [17].

Определение устойчивости к антибиотикам. Культуры изолятов высевали газомом на овсяный агар. Для определения устойчивости выделенных культур к антибиотикам использовали диски индикаторные ДИ-ПЛС-50-01 по ТУ 9398-001-39484474-2000 (НИЦФ, Россия, Санкт-Петербург) с антибиотиками в следующих концентрациях: 20 мкг амоксициллин (АКЦ); 30 мкг налидиксовая кислота (НК); 1.25 / 23.75 мкг триметоприм/сульфаметоксазол (ТС); 30 мкг тетрациклин (ТЕТ); 30 мкг стрептомицин (СТР), 300 ЕД полимиксин (ПОЛ); 15 мкг линкомицин (ЛНК). Измеряли величину диаметров зон ингибирования роста каждым антибиотиком в соответствии с инструкцией к тест-системе.

Методы статистической обработки данных. Массив данных, полученных при тестировании фенотипической устойчивости/чувствительности 152 изолятов к 7 антибиотикам, был подвергнут комплексной статистической обработке. Для выявления значимых связей профилей антибиотической устойчивости с географическим и экологическим факторами ОС использовали методы параметрического (дисперсионного) и непараметрического (тест Крускала-Уоллиса) анализа. Оценивали значимость связей между устойчивостью изолятов к отдельным антибиотикам с помощью корреляционного анализа. Применены также многомерные методы, позволяющие выполнять оптимальное проецирование данных с большим числом переменных в пространствах с малой размерностью [18]. В частности, проведены многоуровневый одновременный компонентный анализ и дисперсионный анализ с применением метода главных компонент, кластерный анализ. На основе многомерного шкалирования данных выполнена ординация антибиотических профилей в пространстве главных компонент [19–21].

Вычисления и анализ осуществлялись с помощью самостоятельно разработанной программы для анализа данных на языке Python (версия 3.14) с использованием следующих библиотек: Scipy – для статистических тестов (ANOVA, Крускала-Уоллиса и др.) и кластерного анализа (иерархическая кластеризация), Statsmodels – для множественных сравнений (Tukey HSD), Scikit-learn – для методов снижения размерности (PCA), масштабирования данных, кластеризации (KMeans) и оценки качества кластеризации (Silhouette score),

Характеристика объектов исследования / Characteristics of research objects

| Экосистемы Ecosystems | Район взятия образца, координаты Sample collection area, coordinates | Объект / Object | Название почвы Name of the soil |
|---|---|---|--|
| Природные Natural | Нолинский район, 57°39' с. ш., 50°12' в. д. Nolinskiy District, N 57°39', E 50°12' | ООПТ «Медведский бор» SPNA “Medvedskiy Bor” | подзол песчаный мелкий на древнеаллювиальных песках / fine sandy podzol on ancient alluvial sands |
| | Котельничский район, 57°58' с. ш., 48°24' в. д. Kotelnichskiy District, N 57°58', E 48°24' | ГПЗ «Нургуш» Nurgush SNR | аллювиальная дерновая зернистая среднегумусная глинистая / alluvial soddy granular medium-humus clayey |
| | Советский район, 57°38' с. ш., 49°02' в. д. Sovetskiy District, N 57°38', E 49°02' | Немдинский скальный комплекс, ООПТ «Пижемский» Nemdinskiy Rock Complex, Pijemskiy SPNA | карбо-петрозём на мергелевском известняке carbon-petrozem on marl limestone |
| | Нагорский район, 59°38' с. ш., 50°02' в. д. Nagorskiy District, N 59°38', E 50°02' | участок «Тулашор» ГПЗ «Нургуш» Tulashor section of the SNR “Nurgush” | подзол на моренных суглинках podzol on moraine loams |
| Антропогенно трансформиро- ванные Anthropogenically transformed | Мурашинский район, 59°51' с. ш., 48°81' в. д. Murashinskiy District, N 59°51', E 48°81' | злаково-разнотравный луг на окраине п. Безбожник a grassy meadow on the outskirts of the village of Bezbozhnik | дерново-подзолистая на моренных суглинках soddy-podzolic on moraine loams |
| | | территория медицинского учреждения / territory of a medical institution | |
| | | площадка сбора и хранения твёрдых коммунальных отходов collection and storage site for municipal solid waste | |
| | Мурашинский район, 59°40' с. ш., 48°96' в. д. Murashinskiy District, N 59°40', E 48°96' | Мурашинский фанерный завод Murashinskiy plywood factory | дерново-подзолистая на моренных суглинках soddy-podzolic on moraine loams |
| Кирово-Чепецкий район, 58°33' с. ш., 49°56' в. д. Kirovo-Chepetsk District, N 58°33', E 49°56' | хранилище производственных отходов химкомбината storage facility for industrial wastes from a chemical plant | техногенное поверхностное образование: группа натурфабрикаты, подгруппа литостраты man-made surface formation: group of natural products, subgroup of lithostrats | |

Примечание: ООПТ – особо охраняемая природная территория, ГПЗ – государственный природный заповедник.
Note: SPNA – specially protected natural area, SNR – state nature reserve.

Pandas – для обработки и агрегации данных, построения таблиц сопряжённости. Визуализация данных осуществлена с помощью библиотек Matplotlib, Seaborn, Networkx и Scipy.cluster.hierarchy.

Результаты и обсуждение

Из почв природных и антропогенно трансформированных экосистем на обследуемой территории Кировской области (6 районов) было получено в общей сложности 152 стрептомицетных изолята. Количественной характеристикой устойчивости культуры к тому или иному антибиотику служила величина зоны ингибирования её роста, выраженная в миллиметрах. Определение устойчивости выделенных культур к 7 антибиотикам разных классов и различных механизмов действия позволило сформировать достаточный по объёму массив данных, который подвергли комплексной статистической обработке.

Средние величины зон ингибирования антибиотиками роста протестированных почвенных изолятов убывали в следующем ряду: СТР (35,6 мм) > ТЕТ (24,0 мм) > ТС (23,3 мм) > АКЦ (14,6 мм) > ПОЛ (14,2 мм) > ЛНК (13,3 мм) > НК (7,2 мм) (рис. 1, см. цв. вкладку VI).

Доля полностью устойчивых культур к наиболее эффективным СТР и ТЕТ не превышала в среднем 2 и 3 %, к ТС и ПОЛ – 25 и 27 %, к ЛНК – 39 %, к НК в зависимости от района – 63–80 %.

Дисперсионный анализ зон ингибирования выявил статистически значимые различия между выборками изолятов из почв разных районов и экосистем для большинства антибиотиков ($p < 0,05$). Результаты были подтверждены непараметрическим тестом Крускала-Уоллиса, что свидетельствует о высокой значимости полученного результата. Исключение составил АКЦ, для которого различия оценивались как статистически незначимые ($p > 0,05$). Отсутствие значимых различий для АКЦ может свидетельствовать о повсеместной распространённости у стрептомицетов на данной территории β-лактамаз, что обеспечивает универсальную устойчивость к β-лактамам антибиотикам.

Анализ корреляций между устойчивостью стрептомицетов к различным антибиотикам в пределах общей выборки изолятов выявил преимущественно слабые связи ($r = 0,10–0,35$), что указывает на независимый характер формирования устойчивости к отдельным антибиотикам. Поиск корреляций в преде-

лах отдельных почвенных локаций выявил значительную вариабельность связей между антибиотиками по районам, что указывает на локальный характер формирования устойчивости (рис. 2, см. цв. вкладку VII).

Низкие значения корреляций между антибиотиками и выраженная вариабельность профилей антибиотикорезистентности (рис. 3, см. цв. вкладку VII) обусловлены, очевидно, наличием нескольких независимых молекулярных механизмов устойчивости.

Известно, что резистентность к СТР может быть связана с ферментативной модификацией аминокликозидов и мутациями рибосомных белков, тогда как для ТЕТ характерны эффлюкс-механизмы и белки защиты рибосомы. Устойчивость к НК часто обусловлена мутациями в генах ДНК-гиразы [22]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что антибиотикорезистентность стрептомицетов обусловлена совокупностью молекулярных механизмов, включающих эффлюкс-системы, модификацию мишеней и ферментативную инактивацию антибиотиков.

Высокая вариабельность корреляционных связей подтверждает отсутствие единого механизма формирования антибиотикорезистентности в отдельных почвенных локациях.

Среди 152 протестированных стрептомицетных изолятов 90 проявили устойчивость одновременно к нескольким антибиотикам с различными механизмами действия. Доля множественно устойчивых штаммов составила в среднем 59,2 %. Высокая распространённость полирезистентных штаммов указывает на накопление в почвенных микробиомах нескольких генетических детерминант устойчивости, вероятно ассоциированных с мобильными генетическими элементами. В рассматриваемом ряду почвенных локаций относительная доля полирезистентных культур варьировала от 22,2 % в карбопетрозёме, формирующемся на выходе рифовых известняков в Советском районе, до 91,7 % в песчаном подзоле особо охраняемой природной территории (ООПТ) «Медведский бор» Нолинского района. Высоким распространением множественно устойчивых штаммов (80 %) отличалась также аллювиальная дерновая почва государственного природного заповедника (ГПЗ) «Нургуш» в Котельничском районе. Другие почвенные локации в Кирово-Чепецком, Нагорском и Мурашинском районах, включая почвы хозяйственно трансформированных экосистем, характери-

И. Г. Широких, Н. А. Боков, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина
«Профили антибиотикорезистентности стрептомицетов
из разных почв Вятского Прикамья». С. 183

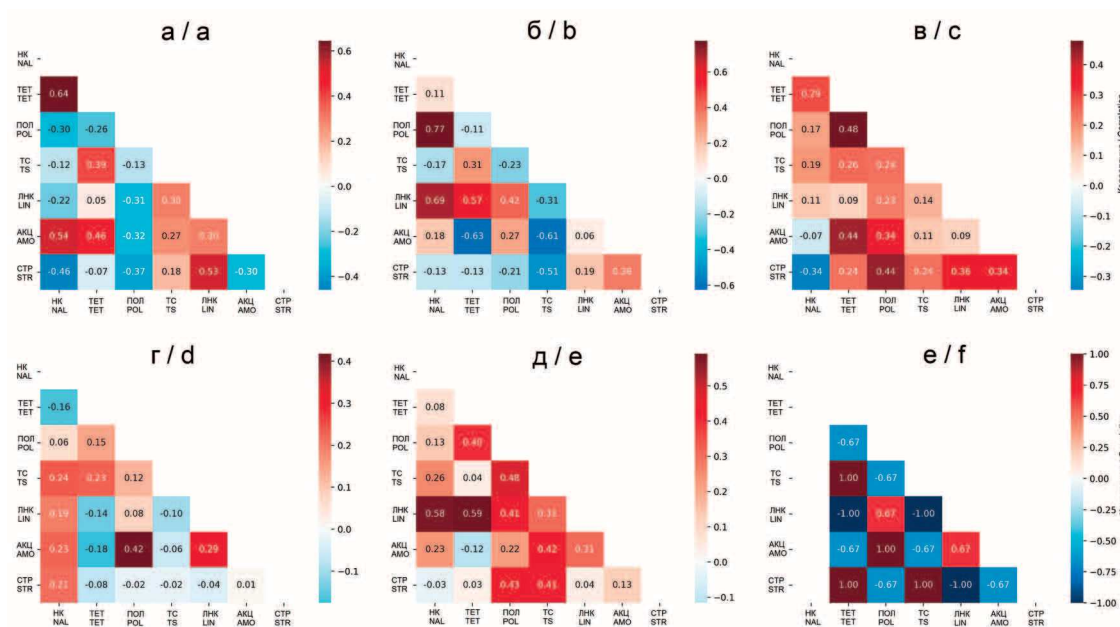


Рис. 2. Корреляции между антибиотиками в почвах различных районов: а – Советский, б – Нолинский, в – Нагорский, г – Мурашинский, д – Котельничский, е – Кирово-Чепецкий
Fig. 2. Correlations between antibiotics in the soils of different districts: а – Sovetskiy, б – Nolinskiy, в – Nagorskiy, д – Murashinskiy, е – Kotelnichskiy, ф – Kirovo-Chepetskiy

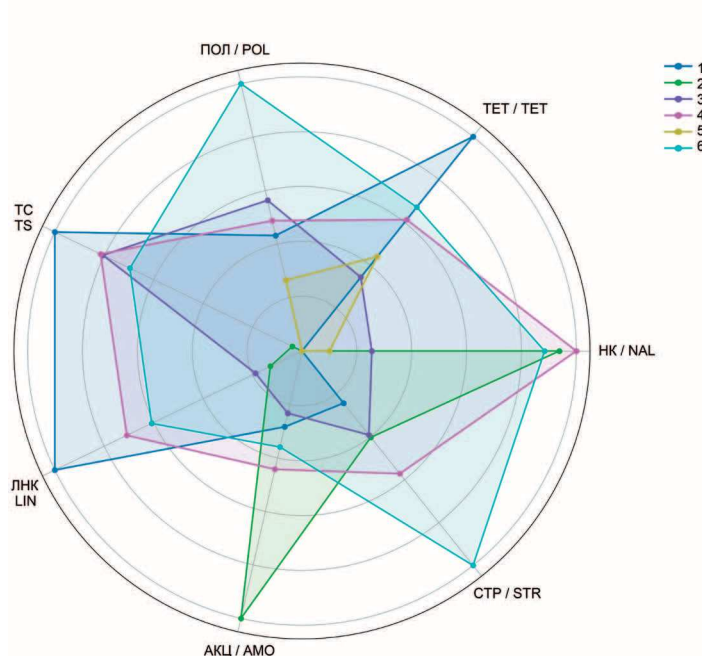


Рис. 3. Сравнение профилей устойчивости к антибиотикам в почвах различных районов: 1 – Кирово-Чепецкий, 2 – Котельничский, 3 – Мурашинский, 4 – Нагорский, 5 – Нолинский, 6 – Советский / **Fig. 3.** Comparison of antibiotic resistance profiles in soils of different districts: 1 – Kirovo-Chepetskiy, 2 – Kotelnichskiy, 3 – Murashinskiy, 4 – Nagorskiy, 5 – Nolinskiy, 6 – Sovetskiy

И. Г. Широких, Н. А. Боков, А. А. Широких, Т. Я. Ашихмина
«Профили антибиотикорезистентности стрептомицетов
из разных почв Вятского Прикамья». С. 183

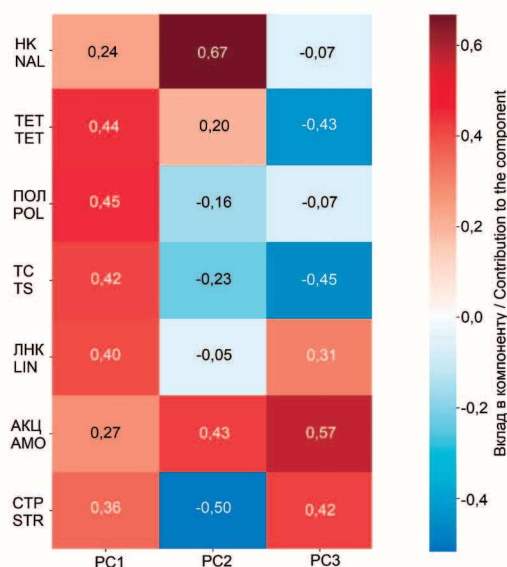


Рис. 4. Матрица вкладов антибиотиков в первые три главные компоненты (PC1, PC2, PC3)
Fig. 4. Matrix of antibiotic contributions to the first three main components (PC1, PC2, PC3)

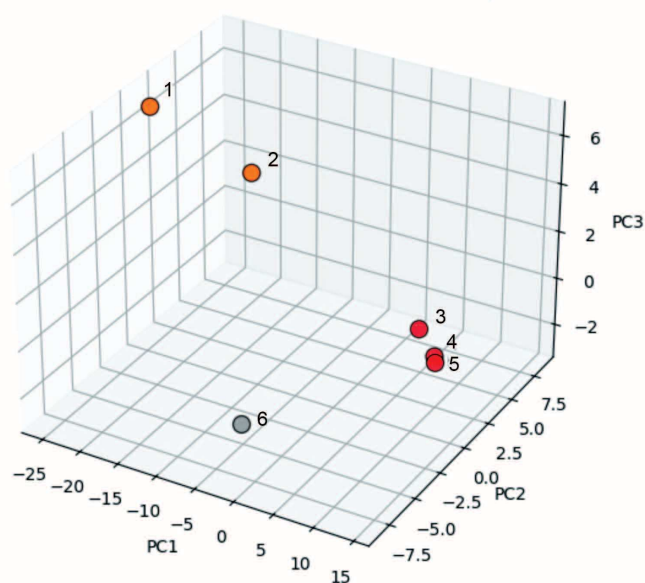


Рис. 5. Ординация районов в пространстве трёх главных осей по паттернам антибиотикорезистентности: 1 – Нолинский, 2 – Котельничский, 3 – Нагорский, 4 – Советский, 5 – Кирово-Чепецкий, 6 – Мурашинский
Fig. 5. Ordination of districts in the space of three main axes according to patterns of antibiotic resistance: 1 – Nolinskiy, 2 – Kotelnichskiy, 3 – Nagorskiy, 4 – Sovetskiy, 5 – Kirovo-Chepetskiy, 6 – Murashinskiy

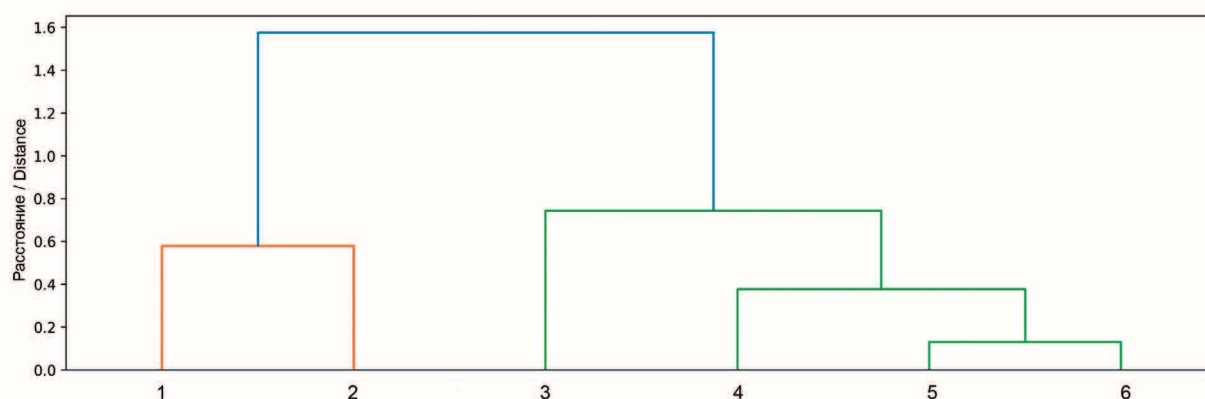


Рис. 6. Дендрограмма сходства между районами по профилям антибиотикорезистентности: 1 – Котельничский, 2 – Нолинский, 3 – Кирово-Чепецкий, 4 – Советский, 5 – Мурашинский, 6 – Нагорский
Fig. 6. Dendrogram of similarity between districts according to antibiotic resistance profiles: 1 – Kotelnichskiy, 2 – Nolinskiy, 3 – Kirovo-Chepetskiy, 4 – Sovetskiy, 5 – Murashinskiy, 6 – Nagorskiy

зовались умеренной встречаемостью штаммов со множественной устойчивостью (50–61 %). Однако в выборках изолятов из техносоли хранилища отходов Кирово-Чепецкого химического комбината и ООПТ «Медведский бор» (Нолинский район) полностью отсутствовали чувствительные к антибиотикам штаммы, что может указывать на селективное давление, которое испытывает почвенный микробиом в этих локациях. Селективное воздействие может быть обусловлено как антропогенной нагрузкой (хранилище отходов химического производства), так и особенностями почв (бедный элементами питания супесчаный подзол «Медведского бора») и связанной с этим микробной конкуренцией.

Комплексный характер различий между профилями антибиотикорезистентности в почвах географически разобщённых районов области был установлен с помощью анализа главных компонент (многомерный дисперсионный анализ). На первые три главные компоненты приходится 69,4 % общей вариации данных (PC1 – 38 %, PC2 – 17,5 %, PC3 – 14,0 %) что свидетельствует о наличии определённой структуры в распределении профилей антибиотикорезистентности.

Вклад в первую главную компоненту всех взятых в исследование антибиотиков (0,24–0,45) положительный, что позволяет интерпретировать её как показатель общей чувствительности штаммов (рис. 4, см. цв. вкладку VIII).

Наибольший вклад в формирование главной компоненты вносят ПОЛ (0,45), ТЕТ (0,44), ТС (0,41) и ЛНК (0,40), что указывает на их ключевую роль в дифференциации штаммов и формировании специфического профиля устойчивости в каждой из исследованных почвенных проб. Во вторую главную компоненту наиболее значителен вклад НК (0,67). Это можно объяснить отличающимся, по сравнению с другими антибиотиками, характером формирования устойчивости у бактерий. С третьей главной компонентой связаны более тонкие различия в антибиотикоустойчивости, возможно специфические реакции отдельных штаммов.

Кластеризация районов отбора почвенных проб в пространстве главных компонент подтвердила значимость различий ($p < 0,05$) антибиотических резистомов в многомерном пространстве (рис. 5, см. цв. вкладку VIII). Это свидетельствует о влиянии на формирование профилей устойчивости географического местоположения.

Иерархический кластерный анализ по профилям антибиотикорезистентности также выявил группы почвенных локаций с близкими профилями антибиотикорезистентности (рис. 6, см. цв. вкладку VIII).

Наиболее близки между собой оказались резистомы почв, сформированных на моренных суглинках в Мурашинском и Нагорском районах, отличающиеся от других исследованных почв самым северным местоположением (59°38'–59°51' с. ш.). На небольшом расстоянии к ним примыкает резистом карбопетрозёма на выходе рифовых известняков в Советском районе. На чуть большей дистанции от трёх первых находится резистом техносоли, формирующейся в Кирово-Чепецком районе в местах хранения отходов химического производства. Отдельный кластер сформировали антибиотические профили двух разных по генезису почв в Нолинском и Котельничском районах, общей особенностью которых является приуроченность к ООПТ – природному заказнику регионального значения «Медведский бор» и ГПЗ «Нургуш». Для этого кластера характерна высокая доля штаммов, устойчивых одновременно к 3–4 антибиотикам (более половины изолятов продемонстрировали ≥ 3 резистентностей). Это свидетельствует, что детерминанты устойчивости к антибиотикам циркулируют в природных почвенных микробиомах и в лесных экосистемах на территории ООПТ, никогда не испытывавших селективного давления антибиотических препаратов. Бактерии естественным путём приобрели защиту от таких антибиотиков, как хинолоны (НК), бета-лактамы (АКЦ), линкомицины (ЛНК) и полипептиды (ПОЛ). Естественно возникающая устойчивость к антибиотикам – обычное явление [10]. Гены резистентности к антибиотикам, как и сами антибиотики, существуют с древних времён [11] и известны в качестве экологического резистома [10]. Эти гены, благодаря мобильным генетическим элементам (плазмиды, транспозоны, интегроны и пр.) могут быть перенесены от почвенных прокариот в геном тех бактерий, которые вызывают заболевания человека и животных.

Заключение

Комплексная статистическая обработка совокупности полученных результатов тестирования 152 культур стрептомицетов на фенотипическую устойчивость к антибиотикам из разных групп и различного механизма действия позволяет считать, что формирование

в почвах локальных антибиотических резистомов значимо определяет сочетание географических и экологических факторов микро-среды, обусловленных типом экосистемы. В географическом аспекте наиболее отличными от других исследованных оказались антибиотические профили изолятов из почв северных районов Кировской области – Нагорского и Мурашинского. Обращает на себя внимание также сходство профилей антибиотикорезистентности в молодых формирующихся почвах, контрастных по своему генезису – техносоли на месте хранилища отходов в Кирово-Чепецком районе и карбо-петрозёма (лептосоли) на выходе карбонатных пород в Советском районе. Применённый статистический инструментарий, несмотря на принадлежность этих почв к разным типам экосистем (трансформированной и природной соответственно), позиционирует их антибиотические профили на близком расстоянии друг от друга как в пространстве трёх главных осей, так и на полученной в результате кластерного анализа дендрограмме. Неожиданным оказался установленный факт, что главным источником мицелиальных прокарриот со множественной устойчивостью к антибиотикам на обследованной территории являются природные лесные экосистемы (ООПТ «Медведский бор» и «Нургуш»). В то же время, среди полученных из техносоли (в трансформированной экосистеме) изолятов, практически не отмечены чувствительные к антибиотикам.

Практическое значение полученных результатов для экологии и мониторинга заключается в статистически доказанной возможности использования фенотипической устойчивости почвенных стрептомицетов в качестве индикатора антропогенной нагрузки на почву и предиктора географической пространственности детерминант устойчивости к антибиотикам.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого (№ FNWE-2025-0005) и Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 125021402208-5).

Литература

1. Кунабаева К.К., Байтурсинов Г.А., Лескен Д.С., Оразымбет Н.Ж., Баймуратова Э.Р. Антибиотикорезистентность: глобальная угроза для здравоохранения // Биология и интегративная медицина. 2025. № 2 (74). С. 352–356.

2. Han F.X., Kingery W., Selim H. Accumulation, redistribution, transport and bioavailability of heavy metals in waste-amended soils // Trace Elements in Soil: Bioavailability, Fluxes and Transfer / Eds. I. Iskander, M. Kirkham. Boca Raton, FL: CRC, 2001. P. 141–168.

3. Baker-Austin C., Wright M.S., Stepanauskas R., McArthur J.V. Co-selection of antibiotic and metal resistance // Trends Microbiol. 2006. V. 14. No. 4. P. 176–182. doi: 10.1016/j.tim.2006.02.006

4. Burridge L., Weis J., Cabello F., Pizarro J., Bostick K. Chemical use in salmon aquaculture: a review of current practices and possible environmental effects // Aquaculture. 2010. V. 306. No. 1–4. P. 7–23. doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.05.020

5. Sieler C., Berendonk T.U. Heavy metal driven co-selection of antibiotic resistance in soil and water bodies impacted by agriculture and aquaculture // Front. Microbiol. 2012. V. 3. Article No. 399. doi:10.3389/fmicb.2012.00399

6. Chapman J.S. Disinfectant resistance mechanisms, cross-resistance, and co-resistance // International Biodeterioration & Biodegradation. 2003. V. 51. No. 4. P. 271–276. doi: 10.1016/S0964-8305(03)00044-1

7. Osman O., Tanguichi H., Ikeda K., Park P., Tanabe-Hosoi S., Nagata S. Copper-resistant halophilic bacterium isolated from the polluted Maruit Lake, Egypt // J. Appl. Microbiol. 2010. V. 108. No. 4. P. 1459–1470. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04574.x

8. Knapp C.W., McCluskey S.M., Singh B.K., Campbell C.D., Hudson G., Graham D.W. Antibiotic resistance gene abundances correlate with metal and geochemical conditions in archived Scottish soils // PLoS One. 2011. V. 6 (11). P. e27300. doi: 10.1371/journal.pone.0027300

9. Shirokikh I.G., Gembitskaya E.A., Ashikhmina T.Y. Spread of antibiotic-resistant actinobacteria in soils exposed to various types of anthropogenic impact // Biol. Bull. Russ. Acad. Sci. 2024. V. 51. P. 3146–3153. doi: 10.1134/S1062359024700936

10. Wright G.D. Antibiotic resistance in the environment: a link to the clinic? // Curr. Opin. Microbiol. 2010. V. 13. No. 5. P. 589–594. doi: 10.1016/j.mib.2010.08.005

11. D’Costa V.M., King C.E., Kalan L., Morar M., Sung W.W.L., Schwarz C., Froese D., Zazula G., Calmels F., Debruyne R., Golding G.B., Poinar H.N., Wright G.D. Antibiotic resistance is ancient // Nature. 2011. V. 477. P. 457–461. doi: 10.1038/nature10388

12. Salyers A.A., Amabile-Cuevas C.F. Why are antibiotic resistance genes so resistant to elimination? // Antimicrob. Agents Chemother. 1997. V. 41. No. 11. P. 2321–2325. doi: 10.1128/AAC.41.11.2321

13. Aminov R.I. A brief history of the antibiotic era: lessons learned and challenges for the future // Front. Microbiol. 2010. V. 1. Article No. 134. doi: 10.3389/fmicb.2010.00134

14. D’Costa V.M., McGrann K.M., Hughes D.W., Wright G.D. Sampling the antibiotic resistome //

Science. 2006. V. 311. No. 5759. P. 374–377. doi: 10.1126/science.1120800

15. Allen H.K., Donato J., Wang H.H., Cloud-Hansen K.A., Davies J., Handelsman J. Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments // *Nat. Rev. Microbiol.* 2010. V. 8. No. 4. P. 251–259. doi: 10.1038/nrmicro2312

16. Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Лысак Л.В., Зенова Г.М. Физикохимия и биология торфа. Методы оценки численности и разнообразия бактериальных и актиномицетных комплексов торфяных почв. Томск: Издательство ТГПУ, 2010. 99 с.

17. Bergeys Manual of Determinative Bacteriology / Eds. J.G. Holt, N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley, S.T. Williams. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 1994. 800 p.

18. Шитиков В.К., Зинченко Т.Д. Многомерный статистический анализ экологических сообществ (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 5–11. doi: 10.25750/1995-4304-2019-1-005-011

19. Harrington P.B., Vieira N.E., Espinoza J., Nien J.K., Romero R., Yergey A.L. Analysis of variance-principal component analysis: A soft tool for proteomic discovery // *Analytica Chimica Acta.* 2005. V. 544. No. 1–2. P. 118–127. doi: 10.1016/j.aca.2005.02.042

20. Jansen J.J., Hoefsloot H.C.J., van der Greef J., Timmerman M.E., Westerhuis J.A., Smilde A.K. ASCA: Analysis of multivariate data obtained from an experimental design // *J. Chemometrics.* 2005. V. 19. P. 469–481. doi: 10.1002/cem.952

21. Xu Y., Fowler S.J., Bayat A., Goodacre R. Chemometrics models for overcoming high between subject variability: applications in clinical metabolic profiling studies // *Metabolomics.* 2014. V. 10. P. 375–385. doi: 10.1007/s11306-013-0616-8

22. Гордеева Е.И., Филиппов П.Н., Турсунова Н.В., Салмин А.В. Варианты генов *Mycobacterium tuberculosis*, ассоциированные с лекарственной устойчивостью к фторхинолонам (обзор литературы) // Научные результаты биомедицинских исследований. 2024. Т. 10. № 3. С. 324–338. doi: 10.18413/2658-6533-2024-10-3-0-1

References

1. Kunanbayeva K.K., Baitursinov G.A., Lesken D.S., Orazymbet N.Zh., Baymuratova Z.R. Antibiotic resistance: a global public health treat // *Biologiya i integrativnaya meditsina.* 2025. No. 2 (74). P. 352–356 (in Russian).

2. Han F.X., Kingery W., Selim H. Accumulation, redistribution, transport and bioavailability of heavy metals in waste-amended soils // *Trace Elements in Soil: Bioavailability, Fluxes and Transfer* / Eds. I. Iskander, M. Kirkham. Boca Raton, FL: CRC, 2001. P. 141–168.

3. Baker-Austin C., Wright M.S., Stepanauskas R., McArthur J.V. Co-selection of antibiotic and metal resistance // *Trends Microbiol.* 2006. V. 14. No. 4. P. 176–182. doi: 10.1016/j.tim.2006.02.006

4. Burrige L., Weis J., Cabello F., Pizarro J., Bostick K. Chemical use in salmon aquaculture: a review of current practices and possible environmental effects // *Aquaculture.* 2010. V. 306. No. 1–4. P. 7–23. doi: 10.1016/j.aquaculture.2010.05.020

5. Sieler C., Berendonk T.U. Heavy metal driven co-selection of antibiotic resistance in soil and water bodies impacted by agriculture and aquaculture // *Front. Microbiol.* 2012. V. 3. Article No. 399. doi:10.3389/fmicb.2012.00399

6. Chapman J.S. Disinfectant resistance mechanisms, cross-resistance, and co-resistance // *International Biodeterioration & Biodegradation.* 2003. V. 51. No. 4. P. 271–276. doi: 10.1016/S0964-8305(03)00044-1

7. Osman O., Tanguichi H., Ikeda K., Park P., Tanabe-Hosoi S., Nagata S. Copper-resistant halophilic bacterium isolated from the polluted Maruit Lake, Egypt // *J. Appl. Microbiol.* 2010. V. 108. No. 4. P. 1459–1470. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04574.x

8. Knapp C.W., McCluskey S.M., Singh B.K., Campbell C.D., Hudson G., Graham D.W. Antibiotic resistance gene abundances correlate with metal and geochemical conditions in archived Scottish soils // *PloS One.* 2011. V. 6 (11). P. e27300. doi: 10.1371/journal.pone.0027300

9. Shirokikh I.G., Gembitskaya E.A., Ashikhmina T.Y. Spread of antibiotic-resistant actinobacteria in soils exposed to various types of anthropogenic impact // *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 2024. V. 51. P. 3146–3153. doi: 10.1134/S1062359024700936

10. Wright G.D. Antibiotic resistance in the environment: a link to the clinic? // *Curr. Opin. Microbiol.* 2010. V. 13. No. 5. P. 589–594. doi: 10.1016/j.mib.2010.08.005

11. D’Costa V.M., King C.E., Kalan L., Morar M., Sung W.W.L., Schwarz C., Froese D., Zazula G., Calmels F., Debryne R., Golding G.B., Poinar H.N., Wright G.D. Antibiotic resistance is ancient // *Nature.* 2011. V. 477. P. 457–461. doi: 10.1038/nature10388

12. Salyers A.A., Amabile-Cuevas C.F. Why are antibiotic resistance genes so resistant to elimination? // *Antimicrob. Agents Chemother.* 1997. V. 41. No. 11. P. 2321–2325. doi: 10.1128/AAC.41.11.2321

13. Aminov R.I. A brief history of the antibiotic era: lessons learned and challenges for the future // *Front. Microbiol.* 2010. V. 1. Article No. 134. doi: 10.3389/fmicb.2010.00134

14. D’Costa V.M., McGrann K.M., Hughes D.W., Wright G.D. Sampling the antibiotic resistome // *Science.* 2006. V. 311. No. 5759. P. 374–377. doi: 10.1126/science.1120800

15. Allen H.K., Donato J., Wang H.H., Cloud-Hansen K.A., Davies J., Handelsman J. Call of the wild: antibiotic resistance genes in natural environments // *Nat. Rev. Microbiol.* 2010. V. 8. No. 4. P. 251–259. doi: 10.1038/nrmicro2312

16. Dobrovolskaya T.G., Golovchenko A.V., Lysak L.V., Zhenova G.M. Physicochemistry and Biology of Peat. Methods for Estimating the Abundance and Diversity

of Bacterial and Actinomycete Complexes of Peat Soils. Tomsk: Izd-vo Tosmk. Gos. Pedagog. Univ., 2010. 99 p. (in Russian).

17. Bergeys Manual of Determinative Bacteriology / Eds. J.G. Holt, N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley, S.T. Williams. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 1994. 800 p.

18. Shitikov V.K., Zinchenko T.D. Multidimensional statistical analysis of ecological communities (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 1. P. 5–11 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-005-011

19. Harrington P.B., Vieira N.E., Espinoza J., Nien J.K., Romero R., Yergey A.L. Analysis of variance-principal component analysis: A soft tool for proteomic discovery // Analytica Chimica Acta. 2005. V. 544. No. 1–2. P. 118–127. doi: 10.1016/j.aca.2005.02.042

20. Jansen J.J., Hoefsloot H.C.J., van der Greef J., Timmerman M.E., Westerhuis J.A., Smilde A.K. ASCA: Analysis of multivariate data obtained from an experimental design // J. Chemometrics. 2005. V. 19. P. 469–481. doi: 10.1002/cem.952

21. Xu Y., Fowler S.J., Bayat A., Goodacre R. Chemometrics models for overcoming high between subject variability: applications in clinical metabolic profiling studies // Metabolomics. 2014. V. 10. P. 375–385. doi: 10.1007/s11306-013-0616-8

22. Gordeeva E.I., Filippov P.N., Tursunova N.V., Salmin A.V. *Mycobacterium tuberculosis* gene variants associated with drugresistance to fluoroquinolones (literature review) // Research Results in Biomedicine. 2024. V. 10. No. 3. P. 324–338 (in Russian). doi: 10.18413/2658-6533-2024-10-3-0-1

Реакция водорослей и цианобактерий лесных и луговых экосистем на техногенное воздействие

© 2026. Л. В. Кондакова^{1,2}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
 Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
 Л. И. Домрачева^{2,3}, д. б. н., профессор, с. н. с.,
 К.А. Безденежных¹, аспирант, И. А. Кондакова¹, к. фил. н., доцент,
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,
³Вятский государственный агротехнологический университет,
 610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр., д. 133,
 e-mail: ecolab2@gmail.com

В статье дана оценка экологического состояния почвенного фототрофного микробного комплекса лесных и луговых экосистем в районе бывшего объекта уничтожения химического оружия (ОУХО) «Марадыковский», где в настоящее время создаётся производственно-технический комплекс (ПТК) Экотехнопарк «Мирный» по утилизации отходов 1 и 2 классов опасности. Природные группировки водорослей и цианобактерий (ЦБ) достаточно широко используются в экологической оценке состояния почвенной среды, что обусловлено рядом их физиолого-биохимических и экологических особенностей. В настоящее время альгоцианофлора района строительства ПТК «Мирный» имеет характерную для широтно-зонального градиента природную структуру сообществ. В лесных почвах по видовому разнообразию преобладают представители отделов Chlorophyta (60,0 %) и Ochrophyta (20,0 %), в луговых – Chlorophyta (44,2 %) и Cyanobacteria (29,5 %). Однако длительный мониторинг водорослей и ЦБ почв лесных и луговых экосистем данной территории показал, что за период функционирования ОУХО в фототрофном комплексе микроорганизмов произошли некоторые изменения. Снизилась процентная доля охрофитовых водорослей, чувствительных к техногенной нагрузке, с 19,2 до 17,0 % и увеличилась доля ЦБ с 24,7 до 26,4 %. При высокой толерантности к меняющимся факторам среды, ЦБ являются надёжными индикаторами в оценке её экологического состояния. В составе доминантов представлены виды из отделов зелёных и охрофитовых водорослей, характерных для почв лесной зоны. В луговых экосистемах доминируют виды родов *Chlamydomonas*, *Chlorococcum* (Chlorophyta), *Phormidium*, *Nostoc*, *Cylindrospermum* (Cyanobacteria). Количественные показатели численности водорослей и ЦБ обусловлены в основном природными факторами. На контрольном участке, находящемся на расстоянии 10 км от объекта, показатели количества водорослей и ЦБ достигали более высоких значений и превышали показатели численности микрофототрофов на участках вблизи объекта в два и более раз. После прекращения функционирования ОУХО «Марадыковский» прошло более 10 лет. Таксономический состав альгоцианофлоры сохраняет исходную зональную структуру.

Ключевые слова: биоиндикация, прокариоты, эукариоты, фототрофные микроорганизмы, загрязнение, мониторинг растительности.

Response of algae and cyanobacteria in forest and meadow ecosystems to man-made impacts

© 2026. L. V. Kondakova^{1,2}, ORCID: 0000-0002-2190-686X, T. Ya. Ashikhmina^{1,2}, ORCID: 0000-0003-4919-0047,
 L. I. Domracheva^{2,3}, ORCID: 0000-0002-7104-3337, K. A. Bezdenezhnykh¹, ORCID: 0000-0003-1030-3219,
 I. A. Kondakova¹, ORCID: 0000-0001-9336-8709,
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,

The article presents estimation of the ecological state of soil phototrophic microbe complex in forest and meadow ecosystems in the vicinity of the former chemical weapons destruction facility “Maradykovskiy” (CWDF). Currently, a production and technical complex “Ecotechnopark “Mirnyy” (PTK) for the disposal of wastes of the 1st and 2nd hazard classes is being created on its territory. Natural groups of algae and cyanobacteria (CB) has a set of physiological-biochemical and ecological features and are widely used in soil state ecological assessing. Nowadays the algocyanoflora communities’ structure within the site of PTC is typical for the forest zone. As for species diversity in forests soils, representatives of Chlorophyta (60.0 %) and Ochrophyta (20.0 %) prevail, while Chlorophyta (44.2 %) and Cyanobacteria (29.5 %) dominate in meadow soils. Still the long-term monitoring of algae and CB in forest and meadow soil ecosystems indicated that certain changes took place in the phototrophic complex of microorganisms during the CWDF operating period. The share of ochrophyte algae sensitive to technogenic load decrease from 19.2 % to 17.0 %, while the share of CB increase from 24.7 % to 26.4 %. CBs are highly tolerant to the changing factors of the environment, thus they serve as a reliable indicator in assessing its ecological status. The dominant species are represented by green and ochrophyte algae, typical in forest soils. The species of the genera *Chlamydomonas*, *Chlorococcum* (Chlorophyta), *Phormidium*, *Nostoc*, *Cylindrospermum* (Cyanobacteria) are the dominants of the communities in meadow ecosystems. The quantitative indexes of the algae and CB number are conditioned mostly by natural factors. On the control site situated 10 km away from the PTC the indexes of algae and CB number were higher than those near the PTC: they exceeded two or more times. Over 10 years passed from the moment when CWDF stopped functioning. The taxonomic composition of algocyanoflora still keeps its original structure.

Keywords: bioindication, prokaryotes, eukaryotes, phototrophic microorganisms, contamination, plant monitoring.

Почвенные фототрофные микроорганизмы находят достаточно широкое применение в экологической оценке состояния окружающей среды, что обусловлено рядом их физиолого-биохимических особенностей [1–4]. При оценке реакции прокариотных и эукариотных фототрофных микроорганизмов на комплекс факторов природной и антропогенной среды применяется система биоиндикации. Она основана на выявлении видового состава водорослей и цианобактерий (ЦБ), доминирующих и специфических видах сообществ, количественных показателей численности и биомассы клеток, динамики развития фототрофных микробных сообществ в природных и создаваемых техногенной нагрузкой условиях среды. Снижение видового разнообразия микрофототрофов, изменение видовой структуры альгосообществ по сравнению с фоновым аналогом является показателем нарушения почвенного биоценоза.

Цель работы – сравнить видовой и количественный состав водорослей и цианобактерий в районе бывшего объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» до начала действия объекта, в период его работы и после завершения его функционирования для оценки возможного негативного воздействия.

Объекты и методы исследования

В Кировской области с сентября 2006 г. по сентябрь 2015 г. в Оричевском районе Ки-

ровской области функционировал объект по уничтожению химического оружия (ОУХО) «Марадыковский» [5, 6]. По объёму производства, площади занимаемой территории, по уровню загрязнения и токсичности загрязнителей данный объект относился к предприятиям 1-го класса опасности [7]. В настоящее время на базе ликвидированного ОУХО создаётся производственно-технический комплекс (ПТК) Экотехнопарк «Мирный». Территория приурочена ко второй надпойменной террасе р. Вятки. Район исследования входит в состав почвенно-климатической лесной зоны, подзоны южной тайги. Зональная растительность представлена еловыми и елово-пихтовыми лесами кисличного типа. Неустойчивые и малоустойчивые к загрязнению почвы под хвойными лесами достигают 67 % изучаемой территории [8]. Мониторинговые исследования данной территории проводились до строительства объекта «Марадыковский», в период его работы и после завершения уничтожения химического оружия. Для каждой почвенно-климатической зоны характерны специфические альго-цианобактериальные ценозы с определённым набором представителей [9, 10]. Изучение почвенных фототрофных микроорганизмов осуществлялось на участках мониторинга, расположенных на разном удалении от объекта: в непосредственной близости к объекту, а также на расстоянии до 10 км.

Пробы отбирались в лесных и луговых фитоценозах в летне-осенние месяцы с со-

блюдением микробиологических требований к отбору проб [9]. Изучение видового состава водорослей и ЦБ проводили прямым микроскопированием отобранных проб почвы, постановкой водных и чашечных культур со «стёклами обрастания». Определение видов проводили с использованием ряда отечественных и зарубежных определителей и электронной базы водорослей AlgaeBase. Количественные показатели альгоцианофлоры определяли прямым микроскопированием почвы на мазках с девятикратной повторностью для получения достоверных данных [11]. Сравнение альгоцианофлоры участков проводили с помощью коэффициента Жаккара [12]. Математическую обработку данных количественного анализа выполняли по общепринятым методикам с использованием программ Past 3.20 и Microsoft Excel 2010.

Результаты и обсуждение

До строительства объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» в 2004–2006 гг. на данной территории проводились экспедиционные исследования, отбирались пробы для лабораторных анализов [13]. Был проведён качественный и количественный учёт водорослей и ЦБ методом прямой микроскопии в отобранных пробах почв 48 лесных и 59 луговых биогеоценозов [14]. Было установлено, что в лесных подзолистых песчаных и супесчаных почвах по видовому разнообразию преобладали представители отделов Chlorophyta (виды родов *Chlamydomonas*, *Coccomyxa*, *Chlorococcum*, *Chlorella*, *Stichococcus*, *Klebsormidium*) и Xanthophyta (виды родов *Botrydiopsis*, *Characiopsis*, *Eustigmatos*). Цианобактерии представлены небольшим числом видов (*Leptolyngbya foveolarum*).

Исследуемые луговые почвы относятся к нескольким типам: дерново-подзолистые супесчаные, дерново-подзолистые суглинистые, аллювиальные дерновые, дерновые оглеенные. В луговых фитоценозах формируются более сложные синузии водорослей и ЦБ. Среди зелёных водорослей широко распространены виды из порядков Chlamydomonadales, Chlorococcales, Chlorosarcinales, характерно присутствие видов из Desmidiaceae и Mesotaeniales. Из диатомовых обычны виды из родов *Navicula*, *Pinnularia* и *Hantzschia amphioxys*. Всего было выявлено 108 видов микроритотрофов: Cyanobacteria – 27; Chlorophyta – 50; Ochrophyta – 21; Bacillariophyta – 10.

Результаты количественного анализа водорослей и ЦБ почв лесных фитоценозов были получены при изучении тысяч почвенных проб. Это позволило установить численность микроритотрофов в подзолистых песчаных и супесчаных почвах сосновых лесов, в ельниках и березняках, которая выражалась миллионами клеток на 1 грамм почвы. В лесах, сформированных на дерново-подзолистых, болотно-подзолистых и дерново-оглеенных почвах этот показатель был существенно ниже – сотни тысяч клеток на 1 грамм почвы [14].

В период функционирования объекта «Марадыковский» с сентября 2006 по сентябрь 2015 гг. на участках мониторинга ежегодно проводился отбор почвенных проб для последующего таксономического и количественного анализа.

Всего в период функционирования объекта было выявлено 120 видов микроритотрофов: Cyanobacteria – 38 (31,7 %); Chlorophyta – 50 (41,7 %); Ochrophyta – 22 (18,3 %); Bacillariophyta – 10 (8,3 %).

В лесных фитоценозах (берёзово-сосняк вейниково-зеленомошный, елово-березняк черничный, сосняк чернично-кисличный, сосняк вейниково-марьянниковый (почва среднеподзолистая песчаная на водноледниковых песках) на территории ключевых участков в районе ОУХО было выявлено 70 видов водорослей. По видовому разнообразию преобладали одноклеточные зелёные водоросли (виды родов *Chlamydomonas*, *Coccomyxa*, *Chlorococcum*, *Chlorella*), нитчатые водоросли из порядка Ulotrichales (*Stichococcus*, *Klebsormidium*) и охрофитовые водоросли (виды родов *Botrydiopsis*, *Characiopsis*, *Eustigmatos*). Результаты видового состава альгофлоры на исследуемой территории согласуются с опубликованными данными других исследователей [15, 16]. Наибольшим числом видов во всех типах леса представлены зелёные и жёлтозелёные водоросли.

В почвах луговых фитоценозов выявлено 119 видов водорослей и ЦБ, в том числе: Cyanobacteria – 37 (31,4 %), Chlorophyta – 49 (41,5 %), Ochrophyta – 22 (18,6%), Bacillariophyta – 10 (8,4 %), Euglenophyta – 1 (0,8 %). Изучались почвы фитоценозов: таволга вязолистная + вербейник монетчатый (почва дерново-глеявая, оподзоленная на водноледниковых отложениях); луговик дернистый + тимopheевка луговая (почва дерново-подзолистая среднесуглинистая на элювии пермских глин). Сравнение полученных результатов с имеющимися данными видового

разнообразия альгоцианофлоры дерново-подзолистых почв [15] показывает близкие в процентном отношении результаты. Согласно данным [17] в луговых экосистемах региона Chlorophyta составляют 37 % видового разнообразия, Cyanobacteria – 33 %, Ochrophyta – 21 %, Bacillariophyta – 8 %, на другие отделы приходится 1 %. Во всех типах луговых почв по разнообразию видов преобладали зелёные водоросли и ЦБ. Изучение состава альгоцианофлоры разных типов почв показало, что максимальное видовое обилие характерно для дерново-подзолистой супесчаной (71 вид) и дерново-подзолистой суглинистой почвы (69 видов). Меньшее видовое разнообразие отмечено для дерновой оглеенной почвы (58 видов).

Количественные показатели развития альгоцианофлоры различаются в зависимости от типа почвы. Так, минимальные показатели численности водорослевых клеток в дерново-подзолистых почвах (суходольные луга) составляли 66 тыс. кл./г, а максимальные – от 500 до 800 тыс. кл./г почвы [14]. В почвах пойменных лугов (аллювиальные дерновые и дерновые оглеенные) показатели численности существенно выше – 400–466 тыс. кл./г и 2000–3000 тыс. кл./г, соответственно.

Сравнение видового разнообразия альгоцианофлоры почв района техногенного воздействия (ОУХО) с фоновой территорией (государственный природный заповедник (ГПЗ) «Нургуш») [18] приведено в таблице 1.

Сравнительный анализ данных (табл. 1) по процентному соотношению альгофлоры почв фоновой территории ГПЗ «Нургуш» и исследуемой территории в районе ОУХО с опубликованными ранее сводными данными по Кировской области [18] позволяет сделать

вывод, что соотношение процентных долей альгоцианофлоры ГПЗ «Нургуш» практически совпадает с региональными данными, а в районе ОУХО проявляется отличие от показателей почвенной альгоцианофлоры фоновых территорий. В почвах с территории ОУХО показатели процентной доли зелёных водорослей составляют 41,7 %, а на территории ГПЗ «Нургуш» – 38,7 %; соответственно ЦБ – 31,7 и 27,7 %. По сравнению с показателем 18,3 % на территории вблизи ОУХО, процентная доля охрофитовых водорослей на территории ГПЗ «Нургуш» составляет 22,7 %. Альгоцианофлора почв луговых фитоценозов района ОУХО, в сравнении с альгоцианофлорой заповедника, имеет некоторые изменения в структуре группировок микрофототрофов: снижение видового разнообразия жёлтозелёных водорослей, чувствительных к техногенной нагрузке, и увеличение разнообразия ЦБ.

Состав доминирующих видов водорослей и ЦБ в почвах фоновой территории и на территории ОУХО приведён в таблице 2.

Сравнение видового разнообразия доминирующих видов альгоцианофлоры на территории в районе ОУХО и фоновой территории позволяет отметить высокое их сходство в лесных фитоценозах (66,6 %) и умеренное сходство (50,0 %) в луговых.

Альгоцианофлора лесных и луговых фитоценозов района ОУХО в целом характерна для широтно-зонального типа почв лесной зоны и по видовому разнообразию имеет отличия от показателей фоновой территории [19].

В постэксплуатационный период 2016–2025 гг. на участках мониторинга ОУХО были продолжены исследования альгоцианофлоры. Было отобрано 72 почвенных образца на 29 площадках мониторинга. В качестве кон-

Таблица 1 / Table 1
Видовой состав водорослей и цианобактерий в почвах ОУХО в сравнении с фоновыми территориями (в среднем за 2006–2015 гг.) / Algae and cyanobacteria species composition in soils of the chemical weapons destruction facility (CWDF) and the reference area (2006–2015)

| Объект Object | Cyanobacteria | | Chlorophyta | | Ochrophyta | | Bacillariophyta | | Всего видов Total | |
|--|---|------|-------------|------|------------|------|-----------------|------|----------------------|------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| | Сводные данные по Кировской области [18] / Total in Kirov region [18] | 166 | 27,7 | 239 | 39,9 | 122 | 20,4 | 66 | 11,0 | 599* |
| ГПЗ «Нургуш» [19] / State Natural Reserve “Nurgush” [19] | 33 | 27,7 | 46 | 38,7 | 27 | 22,7 | 13 | 10,9 | 119 | 100 |
| ОУХО / CWDP | 38 | 31,7 | 50 | 41,7 | 22 | 18,3 | 10 | 8,3 | 120 | 100 |

Примечание: 1 – число видов, 2 – процент; * – встретились представители других отделов.

Note: 1 – the number of species, 2 – percentage; * – representatives of other taxa were found.

Таблица 2 / Table 2

Доминирующие виды водорослей и цианобактерий в почвах фитоценозов ОУХО и фоновой территории (в среднем за период 2006–2015 гг.)
Algae and cyanobacteria dominating species in soils of phytocoenoses within the CWDF and the reference area (2006–2015)

| Объект Objetc | Фитоценоз Phytocoenosis | Виды водорослей / Algae species |
|--|----------------------------|---|
| ГПЗ «Нургуш» State Natural Reserve “Nurgush” | Лес / Forest | <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Bracteococcus minor</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i> (Chlorophyta), <i>Eustigmatos magnus</i> , <i>Pleurochloris lobata</i> , <i>Xanthonema exile</i> (Ochrophyta) |
| | Луг / Meadow | <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Ph. boryanum</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>N. paludosum</i> (Cyanobacteria), <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Ch. gelatinosa</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Bracteococcus minor</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i> (Chlorophyta), <i>Pleurochloris commutata</i> , <i>Botrydiopsis eriensis</i> , <i>Eustigmatos magnus</i> (Ochrophyta), <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Luticola mutica</i> (Bacillariophyta) |
| ОУХО / CWDF | Лес / Forest | <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Coccomyxa solorinae</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i> (Chlorophyta), <i>Eustigmatos magnus</i> (Ochrophyta) |
| | Луг / Meadow | <i>Cylindrospermum muscicola</i> , <i>C. licheniforme</i> , <i>Nostoc punctiforme</i> , <i>N. paludosum</i> , <i>Phormidium formosum</i> , (Cyanobacteria), <i>Chlamydomonas gloeogama</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Chlorococcum infusionum</i> , <i>Klebsormidium flaccidum</i> (Chlorophyta), <i>Eustigmatos magnus</i> , <i>Botrydiopsis eriensis</i> , <i>Characiopsis minima</i> , <i>Xanthonema bristolianum</i> (Ochrophyta), <i>Hantzschia amphioxys</i> (Bacillariophyta) |

трольного фона оставались ранее выбранные луговые и лесные участки, находящиеся в удалении от объекта на расстоянии до 10 км. В изученных луговых и лесных фитоценозах выявлено 106 видов микрофототрофов. Таксономический состав представлен основными отделами почвенных фототрофных микроорганизмов – Cyanobacteria, Chlorophyta, Ochrophyta, Bacillariophyta.

В альгоцианофлоре лесных экосистем выявлено 60 видов микрофототрофов, по видовому разнообразию преобладают Chlorophyta (60,0 %) и Ochrophyta (20,0 %) [20, 21]. Состав доминирующих видов представлен зелёными и охрофитовыми водорослями, характерными для почв лесной зоны.

В луговых экосистемах отмечено 95 видов, в том числе: Chlorophyta (44,2 %), Cyanobacteria (29,5 %), Ochrophyta (16,8 %), Bacillariophyta (9,5 %) [20, 21]. Доминантами сообществ являются Chlorophyta (виды родов *Chlamydomonas*, *Chlorococcum*), Cyanobacteria (виды родов *Phormidium*, *Nostoc*, *Cylindrospermum*). Количественные показатели численности водорослей и ЦБ обусловлены в основном природными факторами. На контрольном участке, находящемся на расстоянии 10 км от объекта, показатели численности водорослей и ЦБ были более высокими.

Полученные данные фонового обследования альгоцианофлоры до начала деятельности ОУХО (2004–2006 гг.), за период функционирования данного объекта (2006–2015 гг.) и в постэксплуатационный период (2016–2025 гг.) приведены в таблице 3.

Анализ видового состава альгоцианофлоры в пробах, отобранных в разные периоды функционирования объекта «Марадыковский», показал, что широтно-зональная структура водорослей и ЦБ сохранялась во все периоды отбора проб (табл. 3). Общее число отмеченных видов микрофототрофов до начала работы объекта составляло 108, в период функционирования – 120, после завершения – 106. Сравнение альгоцианофлоры периодов во время функционирования объекта «Марадыковский» и после завершения работ с помощью коэффициента флористического сходства Жаккара показывает умеренное сходство флор – 41,8 %. Сравнение видового состава микрофототрофов данных периодов по таксономическим группам подтверждает эту закономерность: Cyanobacteria – 43,5 %, Chlorophyta – 42,3 %, Bacillariophyta – 53,8 %, Ochrophyta – 37,9 %.

Таким образом, в период после прекращения функционирования ОУХО «Марадыковский» таксономический состав альго-

Таблица 3 / Table 3

Видовой состав альгоцианофлоры в районе объекта «Марадыковский» в разные сроки исследования
Species composition of algocyanoflora within the “Maradykoskiy” facility at different research periods

| Таксоны Taxa | Периоды наблюдений, гг. / Periods of research | | | | | |
|-----------------|---|---------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| | 2004–2006 | | 2006–2015 | | 2016–2025 | |
| | Число видов Species number | Доля, % Share, % | Число видов Species number | Доля, % Share, % | Число видов Species number | Доля, % Share, % |
| Cyanobacteria | 27 | 24,7 | 38 | 25,9 | 28 | 26,4 |
| Chlorophyta | 50 | 45,8 | 50 | 45,6 | 51 | 48,1 |
| Bacillariophyta | 10 | 9,1 | 10 | 8,9 | 9 | 8,5 |
| Ochrophyta | 21 | 19,2 | 22 | 18,75 | 18 | 17,0 |
| Всего / Total | 108 | 100 | 120 | 100 | 106 | 100 |

Примечание: в течение каждого из периодов пробы отбирались примерно в одни и те же сроки.
Note: the samples were taken at approximately the same time during each of the period.

цианофлоры сохраняет исходную широтно-зональную структуру лесной зоны.

В работе [22] приведён сравнительный анализ альгоценозов, находящихся на разном расстоянии от металлургического комбината «Североникель». Показано, что ярко выраженного влияния техногенного загрязнения на состав и структуру альгоценозов не выявлено, на обследованной территории обнаружена мозаика альгоценозов.

Заключение

Анализ видового состава альго-цианофлоры в пробах, отобранных в разные периоды функционирования объекта «Марадыковский», свидетельствует о том, что видовое разнообразие водорослей и ЦБ с 2004 по 2025 гг. на данной территории сохраняется. Общее число видов микрофототрофов до начала работы объекта составляло 108 видов, в период функционирования ОУХО – 120, после завершения работ на объекте – 106. Сравнение данных по видовому разнообразию альгоцианофлоры в период функционирования объекта «Марадыковский» и после завершения работ с помощью коэффициента флористического сходства Жаккара показывает умеренное сходство флор – 41,8 %. На различия между сообществами микрофототрофов, в таком случае, приходится больше 50 % и, в первую очередь, это происходит за счёт не отмеченных на третьем этапе наблюдений микрофототрофов: *Anabaena cylindrica*, *A. sphaerica*, *Cylindrospermum catenatum*, *C. majus*, *Calotrix gracilis*, *Nostoc commune*, *N. linckia f. muscorum*, *Leptolyngbya hollerbachiana*, *L. fragilis*, *L. notate*, *Microco-*

leus vaginatus, *Oscillatoria limosa*, *O. sancta*, *Phormidium amoenum*, *Ph. animale* (Cyanobacteria), *Bumilleria klebsiana*, *Bumilleriopsis brevis*, *Characiopsis minima*, *Chlorocloster raphidioides*, *Heterococcus viridis*, *Monodus chodatii*, *Tibonema angustissimum* (Ochrophyta), *Caloneis molaris*, *Eunotia tenella*, *Pinnularia gracillima* (Bacillariophyta). Вероятно, их отсутствие в этот период можно рассматривать как отклик на возможное техногенное воздействие и, соответственно, эти виды могут быть использованы в качестве биоиндикаторов на техногенное загрязнение.

Сохранение видового разнообразия и количественных показателей почвенной альгоцианофлоры фитоценозов в природном комплексе на территории в районе функционирования ОУХО «Марадыковский» является подтверждением использования уникальных отечественных технологий обезвреживания и уничтожения боевых отравляющих веществ в период эксплуатации объекта, создания системы промышленной и экологической безопасности, обеспечения штатной безаварийной работы химически опасного предприятия, действующего на данной территории около 10 лет.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 125021402208-5).

Литература

1. Патова Е.Н., Новаковская И.В., Сивков М.Д., Новаковский А.Б. Влияние экологических факторов на формирование альгогруппировок горнотундровых почв (Приполярный Урал) // Теоретическая и прикладная

экология. 2012. № 2. С. 89–98. doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-089-098

2. Дорохова М.Ф., Кошелева Н.Е., Терская Е.В. Экологическое состояние городских почв в условиях антропогенного засоления и загрязнения (на примере Северо-Западного округа Москвы) // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 4. С. 16–24. doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-016-024

3. Пивоварова Ж.Ф., Багаутдинова З.З., Благодатнова А.Г. Возможности использования водорослей в экологической оценке городских почв // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2022. № 4. С. 68–77. doi: 10.21685/2307-9150-2022-4-7

4. Sukhanova N.V., Fazlutdinova A.I., Radygina A.V., Gaysina L.A. Transformation of soil cyanobacterial-algal cenoses affected by urbanization in the South Ural urban areas // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 1. С. 92–104. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-092-104

5. Капашин В.П., Поляков А.И., Круглов В.А. Обеспечение экологической и промышленной безопасности объектов по уничтожению химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 4. С. 10–18. doi: 10.25750/1995-4301-2013-4-010-019

6. Мачехин Н.Г. Уничтожение химического оружия в Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 4. С. 19–20. doi: 10.25750/1995-4301-2013-4-019-020

7. Ашихмина Т.Я. Комплексный экологический мониторинг объектов хранения и уничтожения химического оружия. Киров: Вятка, 2002. 544 с.

8. Олькова А.С., Дабах Е.В. Оценка устойчивости почв и прогноз их состояния в районе уничтожения химического оружия // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 1. С. 73–76. doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-073-076

9. Штина Э.А., Голлербах М.М. Экология почвенных водорослей. М.: Наука, 1976. 143 с.

10. Кузяхметов Г.Г. Водоросли зональных почв степи и лесостепи. Уфа: РИО БашГУ, 2006. 286 с.

11. Домрачева Л.И. «Цветение» почвы и закономерности его развития. Сыктывкар: Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2005. 336 с.

12. Шмидт В.М. Математические методы в ботанике. Л.: Изд-во ГЛНУ, 1989. 287 с.

13. Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Елькина Т.С. Сравнительный анализ специфики альго-микологических комплексов в зоне действия объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 4. С. 73–78. doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-086-091

14. Кондакова Л.В., Домрачева Л.И. Флора Вятского края. Часть 2. Водоросли (Видовой состав, специфика водных и почвенных биоценозов). Киров: ОАО «Кировская областная типография», 2007. 192 с.

15. Алексахина Т.И., Штина Э.А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 148 с.

16. Новаковская И.В., Патова Е.Н. Почвенные водоросли еловых лесов и их изменения в условиях аэротехногенного загрязнения. Сыктывкар: Институт биологии Коми НЦ УрО РАН. 2012. 128 с.

17. Штина Э.А., Зенова Г.М., Манучарова Н.А. Альгологический мониторинг почв // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1449–1461.

18. Штина Э.А. Флора водорослей бассейна реки Вятки. Киров: Кир. обл. тип., 1997. 96 с.

19. Кондакова Л.В., Пирогова О.С. Почвенные водоросли и цианобактерии государственного природного заповедника «Нургуш» // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 94–101. doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-094-101

20. Безденежных К.А., Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Ашихмина Т.Я. Альгологический мониторинг почв в районе объекта «Марадыковский» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 81–88. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-081-088

21. Безденежных К.А., Кондакова Л.В. Количественные показатели и анализ структуры фототрофных микробных сообществ // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы 19 Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров, 25 ноября 2021 г. Киров: Вятский государственный университет, 2021. С. 207–210.

22. Кабиров Р.Р., Черненко Т.В., Суханова Н.В., Шмелев Н.А. Состав и структура альгоценозов северо-таёжных экосистем на различных элементах рельефа в условиях техногенной нагрузки // Теоретическая и прикладная экология. 2013. № 1. С. 94–100. doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-094-100

References

1. Patova E.N., Novakovskaya I.V., Sivkov M.D., Novakovskiy A.B. Influence of ecological factors on algal communities development of mountain tundra soils (Subpolar Urals) // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 2. P. 89–98. doi: 10.25750/1995-4301-2012-2-089-098

2. Dorokhova M.F., Kosheleva N.E., Terskaya E.V. Ecological state of urban soils subject to anthropogenic salinization and pollution (the North-Western District of Moscow as a study case) // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 16–24. doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-016-024

3. Pivovarova Zh.F., Bagautdinova Z.Z., Blagodatnova A.G. Possibilities of using algae in the ecological assessment of urban soils // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki = University proceedings. Volga region. Natural sciences. 2022. No. 4. P. 68-77 (in Russian). doi: 10.21685/2307-9150-2022-4-7

4. Sukhanova N.V., Fazlutdinova A.I., Radygina A.V., Gaysina L.A. Transformation of soil cyanobacterial-algal cenoses affected by urbanization in the South Ural urban areas // *Theoretical and Applied Ecology*. 2025. No. 1. P. 92–104. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-092-104
5. Kapashin V.P., Polyakov A.I., Kruglov V.A. Providing industrial and ecological safety of chemical weapons decommission plants // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 4. P. 10–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-4-010-019
6. Machekhin G.N. Chemical weapons decommission in Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 4. P. 19–20 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-4-019-020
7. Ashikhmina T.Ya. Complex ecological monitoring of chemical weapons storage and decommission plants. Kirov: Vyatka, 2002. 544 p. (in Russian).
8. Olkova A.S., Dabakh E.V. Evaluating Soils Sustainability and the Project of their State within the area of Chemical Weapons Decommission // *Theoretical and Applied Ecology*. 2010. No. 1. P. 73–76 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-073-076
9. Shtina E.A., Gollerbach M.M. Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 143 p. (in Russian).
10. Kuzyakhmetov G.G. Algae of steppe and forest-steppe soils. Ufa: RIO BashGU, 2006. 286 p. (in Russian).
11. Domracheva L.I. Soil blooming and the patterns of its development. Syktyvkar, 2005. 336 p. (in Russian).
12. Shmidt V.M. Methods of Mathematics in Botany. Leningrad: Izdatelstvo GLU, 1989. 287 p. (in Russian).
13. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V., Dabakh E.V., El'kina T.S. Comparative analysis of peculiar features of soil alga-mycological complexes near the chemical weapons storage and decommission plant “Maradykovky” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 4. P. 73–78 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-086-091
14. Kondakova L.V., Domracheva L.I. Flora of the Vyatka region. Part 2. Algae (Species composition, specific features water and soil biocoenoses). Kirov: OAO “Kirovskaya oblastnaya tipografiya”; 2007. 192 p. (in Russian).
15. Aleksakhina T.I., Shtina E.A. Soil algae of biogeocoenoses. Moskva: Nauka, 1984. 148 p. (in Russian).
16. Novakovskaya I.V., Patova E.N. Soil algae of spruce forests and their change in conditions of aerotechnogenic pollution. Syktyvkar. Institut Biologii Komi NTs URO RAN. 2012. 128 p. (in Russian).
17. Shtina E.A., Zenova G.M., Manucharova N.A. Algological soil monitoring // *Soil Studies*. 1998. No. 12. P. 1449–1461 (in Russian).
18. Shtina E.A. Flora of algae of the Vyatka region. Kirov: Kirov obl. tip., 1997. 96 p. (in Russian).
19. Kondakova L.V., Pirogova O.S. Soil algae and cyanobacteria of the State Nature Reserve “Nurgush” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 3. P. 94–101 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-094-101
20. Bezdenezhnykh K.A., Kondakova L.V., Dabakh E.V., Ashikhmina T.Ya. Algological monitoring of soils in the vicinity of the plant “Maradykovskiy” // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 81–88 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-081-088
21. Bezdenezhnykh K.A., Kondakova L.V. Quantitative indicators and the analysis of the structure of phototrophic microbial communities // *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems / Materialy 19 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. Kirov, 25 Nov. 2021. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2021. P. 207–210 (in Russian).
22. Kabirov R.R., Chernen`kova T.V., Sukhanova N.V., Shmelev N.A. Composition and structure of algocenoses of north boreal ecosystems in different relief parts in conditions of technogenic pressure // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 94–100 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-094-100

Состояние фотосинтетического аппарата и уровень окислительного стресса хвои *Abies sibirica* L. на разных стадиях усыхания деревьев, поражённых уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandford) в лесных насаждениях Пермского края

© 2026. М. А. Шелякин^{1,2}, к. б. н., н. с., Е. В. Гармаш², д. б. н., в. н. с.,
Е. В. Силина^{1,2}, к. б. н., н. с., К. В. Ядрихинский², ст. лаборант,
Э. Е. Ротэрмель¹, лаборант, Л. А. Иванчина¹, к. с-х. н., зав. лабораторией,
¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: shelyakin@ib.komisc.ru

Массовое усыхание пихты (*Abies sibirica* L.) в таёжной зоне России спровоцировано инвазионным стволовым вредителем – уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus*). Ранняя диагностика очагов поражения требует разработки экспресс-методов дистанционного зондирования и новых вегетационных индексов, чувствительных к изменению физиолого-биохимических параметров хвои. Исследования проводили на 15 участках хвойно-широколиственных лесов Пермского края. Выделены следующие категории санитарного состояния деревьев пихты (КСС): здоровое (I), ослабленное (II), сильно ослабленное (III), усыхающее (IV), среди категории погибших деревьев исследовали свежий (V) и старый сухостой (VI). Изучали состояние фотосинтетического аппарата хвои по содержанию пигментов и показателям индуцированной флуоресценции хлорофилла, а также уровень окислительного стресса – по концентрации H₂O₂ и продуктов перекисного окисления липидов. В хвое деревьев первых трёх КСС с увеличением степени их усыхания параметры флуоресценции хлорофилла, отражающие эффективность использования световой энергии (F_v/F_m , Φ_{PSII} , ETR), проявляли тенденцию к снижению на фоне стабильного содержания фотосинтетических пигментов и их соотношений. При этом коэффициент нефотохимического тушения флуоресценции хлорофилла (NPQ) и концентрация прооксидантов незначительно, но повышались, что указывало на мобилизацию защитных механизмов. Заметные повреждения фотосинтетического аппарата, характеризующиеся деградацией хлорофиллов, ослаблением фотосинтетической активности и усилением окислительных реакций, зафиксированы в хвое уже усыхающих деревьев (КСС IV). У хвои погибших деревьев (V–VI) содержание пигментов резко снижалось, фотосинтез прекращался, а уровень прооксидантов заметно падал, что свидетельствовало о прекращении жизненных процессов. Намечены перспективы применения параметров состояния фотосинтетического аппарата и прооксидантного статуса хвои пихты для создания моделей дистанционного мониторинга на основе спектральных характеристик отражения крон.

Ключевые слова: *Abies sibirica*, флуоресценция хлорофилла, фотосинтетические пигменты, пероксид водорода, перекисное окисление липидов, усыхание, *Polygraphus proximus*.

Photosynthetic apparatus state and oxidative stress level in needles of *Abies sibirica* L. at different stages of tree dieback infested with the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in forest stands of the Perm Krai

© 2026. М. А. Shelyakin^{1,2} ORCID: 0000-0001-8537-6995, Е. В. Garmash² ORCID: 0000-0001-8104-5048,
Е. В. Silina^{1,2} ORCID: 0000-0002-9632-3431, К. В. Yadrkhinsky² ORCID: 0009-0002-1190-9271,
Е. Е. Rotermel¹ ORCID: 0009-0007-0238-9178, Л. А. Ivanchina¹ ORCID: 0000-0001-9476-8683

¹Perm State University,

4, Genkel St., Perm, Russia, 614990,

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: shelyakin@ib.komisc.ru

The invasive stem pest, four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus*, drives the *Abies sibirica* L. massive dieback in the Russian taiga zone. Early detection of infestation hotspots requires the development of rapid remote sensing methods and novel vegetation indices sensitive to changes in the physiological and biochemical parameters of needles. Research was completed across 15 sites in coniferous-broadleaf forests in the Perm Krai. The following categories of fir tree sanitary condition (CSC) were identified: healthy (I), weakened (II), severely weakened (III), dying (IV); and among dead trees: recent deadwood (V) and old deadwood (VI). We assessed the photosynthetic apparatus state in the needles by photosynthetic pigment content and chlorophyll fluorescence parameters. Oxidative stress level was evaluated by measuring H_2O_2 and lipid peroxidation products concentration in the needles. In the needles of the I–III CSC trees, with increasing desiccation rate, chlorophyll fluorescence parameters reflecting the efficiency of light energy using (F_v/F_m , Φ_{PSII} , ETR) tended to decrease while photosynthetic pigment content and ratios were stable. Concurrently, the non-photochemical quenching coefficient (NPQ) and pro-oxidant content slightly increased, indicating a mobilization of protective mechanisms. Significant damage of the photosynthetic apparatus, characterized by chlorophyll degradation, weakened photosynthetic activity, and increased oxidative reactions, was recorded in the dying trees' (CSC IV) needles. In the needles of dead trees (V–VI), pigment content dropped sharply, photosynthesis ceased, and pro-oxidant level declined markedly, indicating the cessation of vital processes. Prospects for using parameters of the photosynthetic apparatus and the pro-oxidant status of fir needles are outlined for creating remote monitoring models based on the spectral reflectance of tree crowns.

Keywords: *Abies sibirica*, chlorophyll fluorescence, photosynthetic pigments, hydrogen peroxide, lipid peroxidation, dieback, *Polygraphus proximus*.

В последние десятилетия отмечается расширение зоны усыхания и/или деградации темнохвойных лесов на территории Северной Евразии из-за климатических изменений, негативного антропогенного воздействия и активизации размножения и распространения вредителей [1, 2]. В лесах Российской Федерации особенно остро стоит проблема усыхания насаждений пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) из-за молниеносного распространения инвазионного стволового вредителя – полиграфа уссурийского (*Polygraphus proximus* Blandford) [3]. В Сибири деградация пихтовых лесов, поражённых *P. proximus*, достигла катастрофических масштабов, что привело к значительному усилению пожароопасности, изменению микроклиматических условий, структуры подлеска и растительности под пологом лесов [4, 5]. В Пермском крае полиграф уссурийский был идентифицирован в 2022 г. К настоящему времени территория его расселения и площади повреждённых им пихтовых насаждений в регионе значительно расширились [6].

Известно, что продолжительное негативное влияние *P. proximus* на деревья связано с функционированием гриба-симбионта *Grosmannia aoshimae*. Ослабленные инвайдером деревья погибают из-за некроза луба, вызываемого грибом [7]. За поражением флоэмных сосудов (луба) происходит отмирание коры и далее хвои, затем дерево погибает. В среднем гибель пихты происходит за 3–5 лет.

Основным методом санитарно-оздоровительных мероприятий, ограничивающих экспансию *P. proximus* в пихтарники, являются санитарные рубки [3]. Для эффективного контроля санитарных рубок целесообразна идентификация поражённых деревьев на ран-

них стадиях их усыхания. Экспресс-методом обнаружения поражённых древостоев является дистанционный мониторинг по космоснимкам и с помощью беспилотных летательных аппаратов с применением вегетационных индексов отражения, чувствительных к изменению показателей фотосинтетической активности хвои [8]. Среди вегетационных спектральных индексов часто используются такие как PRI (Photosynthetic Response Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), отражающие степень эффективности использования света хвоей [9–11], NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Chl NDI (Chlorophyll Normalized Difference Vegetation Index) и SIPI (Structural Independent Pigment Index), указывающие на изменения содержания хлорофиллов и соотношения хлорофиллы : каротиноиды [12].

Помимо индексов, связанных с функциональным состоянием фотосинтетического аппарата, предпринимаются попытки разработки показателей, отражающих уровень окислительного стресса [13]. Воздействие любых стресс-факторов приводит к усилению окислительных реакций, главным индикатором которых является увеличение генерации активных форм кислорода (АФК). Дисбаланс между генерацией АФК и способностью клеток их нейтрализовать приводит к окислительному стрессу [14–17]. Вместе с тем, АФК выполняют функцию сигнальных молекул. Пероксид водорода (H_2O_2), как наиболее долго живущая АФК, является одним из ключевых мессенджеров сигнальных путей стресс-ответа [18, 19]. Другим важным показателем окислительного стресса служит уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ), включающий активацию и деградацию липидных ради-

калов как основного субстрата окисления в биологических мембранах [15]. Активация ПОЛ приводит к нарушению функций биологических мембран.

В настоящее время применение дистанционных методов позволяет обнаружить очаги *A. sibirica*, поражённых *P. proximus*, на поздних стадиях усыхания, когда в хвое большей части кроны уже разрушен хлорофилл [20–22]. Для идентификации и мониторинга ранних стадий усыхания и полноценного анализа состояния древостоя дистанционными методами необходимо в совокупности проводить оценку состояния параметров фотосинтетического аппарата и уровня развития окислительного стресса в хвое, позволяющих выявить и детализировать этапы, предшествующие разрушению жизненно-важных биомолекул. Это внесёт вклад в разработку своевременных и целесообразных мер ликвидации очагов поражения деревьев, будет способствовать подбору и оценке новых спектральных индексов на основе физиологических параметров.

Целью работы было оценить функциональное состояние фотосинтетического аппарата и содержание прооксидантов в хвое *A. sibirica*, поражённых полиграфом уссурийским.

Объекты и методы исследования

В задачи работы входило проанализировать степень чувствительности исследуемых физиологических параметров в зависимости от степени усыхания деревьев.

Объектом исследований служили лесные насаждения в зоне хвойно-широколиственных лесов Пермского края. Поскольку чистые пихтарники в районе исследований отсутствуют, подбирались смешанные насаждения с участием пихты в породном составе (рис. 1).

Полевые работы проводились в августе 2025 г. на 15 пробных площадях (ПП), заложенных согласно ОСТ 566983. Размер ПП определяли таким образом, чтобы было учтено не менее 100 деревьев главной породы. Координаты расположения ПП снимались с помощью ГНСС-приёмника (PrinCe i20AR, Китай). Основная часть ПП была заложена в насаждениях зеленомошного и кисличного типов леса. Доля участия пихты в составе древостоев варьировала от 3 до 70 %. Класс возраста древостоев пихты на ПП варьировал от 3 (41–60 лет) до 5 (81–100 лет). Преобладали насаждения 4–5 классов возраста.

На каждой ПП был проведён сплошной перебор деревьев. У каждого дерева визуально

определялась категория санитарного состояния (КСС) по Правилам санитарной безопасности в лесах (Постановление Правительства Российской Федерации № 2047). Выделили следующие КСС деревьев изучаемого вида: I – здоровые (без признаков ослабления) – деревья с отсутствием каких-либо признаков повреждения, II – ослабленные – деревья с наличием менее 25 % сухих ветвей, незначительных повреждений, небольших сухобочин, III – сильно ослабленные – наличие сухих ветвей от 25 до 50 %, плодовых тел трутовиков и дупел на стволах, IV – **усыхающие** – усыхание более 2/3 ветвей кроны, хвоя рыже- и/или жёлто-зелёная. В категории погибших деревьев выделяли V – свежий сухостой – хвоя рыжая, красно-бурая, кора частично опала и VI – старый сухостой – хвоя отсутствует или сохранилась частично, часть ветвей опали, кора разрушена, осыпалась частично или полностью. У каждого дерева визуально оценивали наличие следов заселения или отработки *P. proximus* по входным отверстиям, смолотечению и по наличию буровой муки.

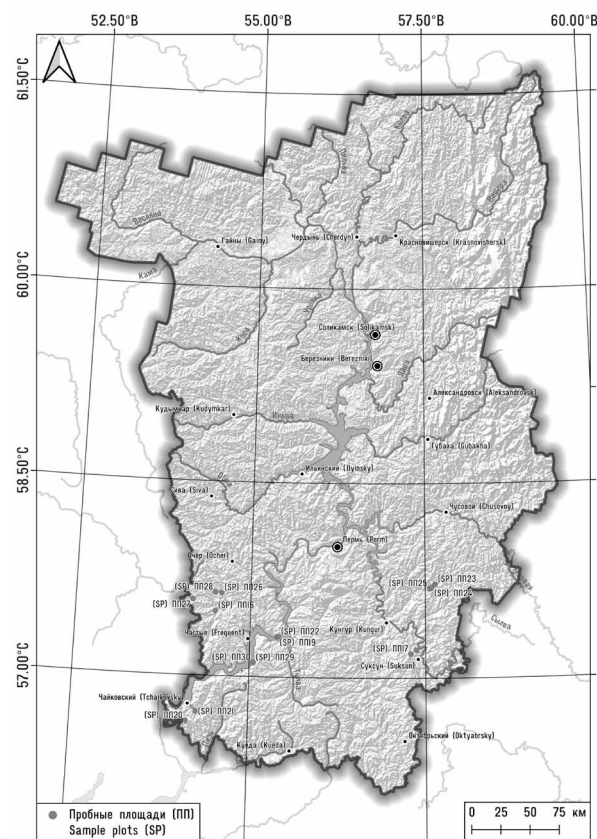


Рис. 1. Схема расположения заложённых пробных площадей на территории Пермского края
 Fig. 1. A map showing the location of the sample plots in the Perm Krai

Встречаемость заселённых и обработанных вредителем деревьев пихты определяли в процентах от общего запаса породы. Доля не повреждённых вредителем деревьев была менее 21 %. В трёх лесных массивах все деревья пихты были повреждены вредителем.

Для измерения биохимических показателей проводили отбор хвои второго-третьего года у деревьев каждой КСС на ПП. Ветви для отбора хвои срезали со средней части кроны с высоты в среднем от 8 до 12 м, используя секатор и телескопическую лестницу. Образцы хвои взвешивали на портативных весах Scout-Pro (Китай) и сразу замораживали в жидком азоте. Далее образцы транспортировали в лабораторию на сухом льду и хранили при -80°C до проведения анализов.

Функциональное состояние фотосинтетического аппарата хвои *A. sibirica* оценивали по параметрам индуцированной флуоресценции хлорофилла *a* фотосистемы II (ФСII) на флуориметре РАМ 2100 (Walz, Германия) в полевых условиях на неотделённой хвое. Фоновый (F_0) и максимальный (F_m) уровни флуоресценции измеряли у хвои, предварительно выдержанной 30 мин в темноте для полной разгрузки реакционных центров. Величины стационарного (F_t), фонового (F_0) и максимального (F_m) уровня флуоресценции измеряли у хвои, адаптированной в течение 3–5 мин к актиничному свету интенсивностью 300 мкмоль ФАР/м² с. Расчёт значений максимального (F/F_m) и реального (Φ_{PSII}) квантового выхода ФСII, и коэффициента нефотохимического тушения (NPQ), характеризующих функциональное состояние ФСII, осуществляли согласно [23].

Перед анализом содержания фотосинтетических пигментов хвою предварительно лиофилизировали в сублимационной сушке Beta-2-8-LSCbasic (Christ, Германия). Экстракцию пигментов из образца проводили 100 % ацетоном с добавлением воды. Содержание хлорофиллов (Хл) и каротиноидов (Кар) в экстракте определяли спектрофотометрически (здесь и далее использовали спектрофотометр UV-1700, Shimadzu, Япония) путём регистрации оптической плотности при длинах волн 662, 644 и 478 нм [24].

Интенсивность ПОЛ определяли по накоплению в тканях хвои продуктов, реагирующих с тиобарбитуровой кислотой (ТБК-РП) [25]. Растительный материал гомогенизировали в 0,1 М Трис-НСl буфере (рН 7,6), добавляли 0,5 % тиобарбитуровую кислоту в 20 % трихлоруксусной кислоте. Пробы инку-

бировали 30 мин при 100°C на водяной бане. После охлаждения пробы центрифугировали при 10 000 g в течение 10 мин. Адсорбцию супернатанта определяли спектрофотометрически при длинах волн 532 и 600 нм. Содержание ТБК-РП рассчитывали с использованием коэффициента экстинкции ТБК 155 л/(мМ см) после вычитания поглощения при 600 нм.

Содержание H_2O_2 определяли с использованием ксиленолового оранжевого согласно [26]. Растительную ткань гомогенизировали в дистиллированной воде. Гомогенат центрифугировали при 12 000 g в течение 15 мин. Поглощение конечного продукта в супернатанте определяли спектрофотометрически при длине волны 560 нм. Содержание H_2O_2 рассчитывали по градуировочной зависимости и выражали в мкмоль/г сухой массы.

Статистическую обработку полученных результатов осуществляли в программе Statistica 10 (StatSoft Inc., США). Для проверки нормальности распределения данных использовали критерий Шапиро-Уилкса. Значимость различий между средними значениями показателей в зависимости от КСС деревьев оценивали с применением дисперсионного анализа ANOVA, критерий Тьюки для неравных объёмов выборок или Краскела-Уоллиса (в зависимости от распределения данных) при $P \leq 0,05$. В таблицах и на рисунках приведены средние арифметические значения со стандартной ошибкой.

Результаты и обсуждение

Содержание хлорофиллов и каротиноидов, а также их соотношение в хвое деревьев *A. sibirica* КСС I–III **существенно не изменялись** (табл.). У деревьев КСС IV концентрация зелёных пигментов достоверно снижалась в среднем в 1,2 раза по сравнению с КСС I–III, содержание каротиноидов не изменялось. Хвоя особей КСС V и VI характеризовалась резким сокращением пула Хл и Кар в среднем в 8 и 5 раз соответственно по сравнению с КСС I–III.

Величины содержания и соотношения фотосинтетических пигментов в хвое *A. sibirica* КСС I–III были в пределах значений, характерных для хвои здоровых деревьев пихты в летний период в подзоне средней тайги Республики Коми [27]. Судя по значениям соотношения Хл *a/b* (табл.) сокращение пула зелёных пигментов происходило за счёт разрушения Хл *a*, что свидетельствовало об уменьшении эффективности использования

Таблица / Table

Содержание фотосинтетических пигментов (мг/г сухой массы) в хвое пихты *Abies sibirica* разных категорий санитарного состояния / Content of photosynthetic pigments (mg/g dry weight) in the needles of *Abies sibirica* of different categories of sanitary condition (CSC)

| КСС CSC | Хл <i>a</i> Chl <i>a</i> | Хл <i>b</i> Chl <i>b</i> | Хл (<i>a+b</i>) Chl (<i>a+b</i>) | Хл <i>a/b</i> Chl <i>a/b</i> | Кар Car | Хл/Кар Chl/Car |
|------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| I | 2,25 ± 0,16 ^a | 1,12 ± 0,07 ^{ab} | 3,37 ± 0,22 ^a | 2,01 ± 0,06 ^a | 0,55 ± 0,02 ^a | 6,03 ± 0,13 ^a |
| II | 2,49 ± 0,06 ^a | 1,21 ± 0,03 ^a | 3,69 ± 0,08 ^a | 2,09 ± 0,05 ^a | 0,60 ± 0,01 ^a | 6,20 ± 0,03 ^a |
| III | 2,40 ± 0,06 ^a | 1,17 ± 0,04 ^a | 3,57 ± 0,09 ^a | 2,09 ± 0,05 ^a | 0,58 ± 0,01 ^a | 6,18 ± 0,04 ^a |
| IV | 2,00 ± 0,07 ^b | 1,05 ± 0,03 ^{ab} | 3,04 ± 0,10 ^b | 1,91 ± 0,05 ^a | 0,54 ± 0,02 ^a | 5,67 ± 0,04 ^a |
| V | 0,19 ± 0,03 ^c | 0,29 ± 0,05 ^c | 0,48 ± 0,08 ^c | 0,81 ± 0,08 ^b | 0,13 ± 0,01 ^b | 3,15 ± 0,26 ^b |
| VI | 0,14 ± 0,03 ^c | 0,24 ± 0,06 ^c | 0,39 ± 0,09 ^c | 0,72 ± 0,07 ^b | 0,11 ± 0,02 ^b | 3,16 ± 0,32 ^b |

Примечание: представлены средние арифметические значения и их стандартные ошибки содержания и соотношения хлорофиллов (Хл *a* и *b*) и каротиноидов (Кар). Разные надстрочные символы обозначают статистическую значимость различий между величинами параметра в зависимости от категории санитарного состояния дерева (КСС) (критерий Краскела-Уоллиса, $P \leq 0,05$).

Note: The means and their standard errors of the chlorophylls (Chl *a* and *b*) and carotenoids (Car) content and ratio are presented. Different superscript letters indicate statistical differences between parameter's values depending on the trees' CSC (Kruskal-Wallis test, $P \leq 0.05$).

света в реакционных центрах фотосистем [28]. Снижение величины Хл/Кар с увеличением КСС было менее выраженным и указывало на более высокую стрессоустойчивость Кар по сравнению с Хл. Каротиноиды, помимо функции поглощения световой энергии, выполняют фотопротекторную роль, защищая фотосинтетический аппарат и, в целом, клетку от избытка света и АФК [28]. Хорошо известно об участии Кар ксантофиллового цикла, вносящих основной вклад в развитие нефотохимического тушения избытка световой энергии ФСII (NPQ), в защите фотосинтетического аппарата от фотодеструкции [29].

Возможность использования вегетационных индексов отражения Chl NDI и SIPI показана для оценки усиления уровня стресса ели красной и пихты бальзамической с увеличением высоты [12]. Однако содержание пигментов в данной работе не определяли. В другом исследовании на примере хвои здоровых и стрессированных затоплением или загрязнением воздуха деревьев нескольких хвойных пород было выявлено, что разница в содержании хлорофиллов в среднем в 1,5 раза статистически значимо влияла на изменения спектров отражения в области 698–955 нм [30]. При этом хвоя деревьев уже имела видимые признаки нарушений в виде пожелтения и/или побурения. Полученные в наших исследованиях данные указывают на то, что содержание и соотношение фотосинтетических пигментов в хвое, а, следовательно, и связанные с ними вегетационные индексы не могут в полной мере свидетельствовать о ранних этапах усыхания поражённой иввайдером пихты.

Показатели индуцированной флуоресценции хлорофилла ФСII. Величина максимального квантового выхода (F_v/F_m), отражающего потенциальную способность ФСII использовать поглощённую световую энергию для фотохимических реакций, у хвои деревьев КСС I–III составляла в среднем 0,82, что типично для здорового листа (рис. 2А). У деревьев КСС IV выявлено достоверное снижение значений F_v/F_m в среднем на 40 % относительно деревьев КСС I–III. При этом наблюдали существенное увеличение разброса между максимальными и минимальными значениями параметра. У деревьев КСС V величина F_v/F_m не превышала 0,1, что свидетельствовало о сильном повреждении фотосинтетического аппарата. Более высокую чувствительность к усыханию проявляли такие параметры как реальный квантовый выход (Φ_{PSII}) и скорость транспорта электронов (ETR), отражающие эффективность использования поглощённых квантов света в фотохимических реакциях в ФСII хвои в реальных условиях освещения (рис. 2В, С). Тенденцию к снижению этих показателей отмечали уже у деревьев КСС II–III. У сильно ослабленных деревьев снижение и одновременно разброс между максимальными и минимальными значениями Φ_{PSII} и ETR были более выражены. У деревьев КСС V величины Φ_{PSII} и ETR приближались к нулю, что свидетельствовало о крайне низкой способности к фотосинтезу.

Величина коэффициента NPQ, характеризующего уровень тепловой диссипации поглощённой хвоей световой энергии, проявляла тенденцию к увеличению у деревьев КСС I–III, однако у деревьев КСС IV снижалась и была

ниже значений хвои здоровых деревьев. Уровень NPQ хвои деревьев КСС V был ниже в среднем в 3 раза относительно КСС I (рис. 2D).

Хвоя деревьев КСС VI не проявляла фотохимической активности (все исследуемые параметры были равны нулю).

В литературе имеется достаточно обширный материал об использовании параметров индуцированной флуоресценции Хл для оценки реакции и выявления механизмов адаптации фотосинтетического аппарата хвойных пород при изменении условий среды.

Установлены адаптивные изменения параметров флуоресценции хлорофилла ФСII в хвое растений подзоны средней тайги к сезонным флуктуациям свето-температурного режима [27]. Изменения величин ETR и NPQ адекватно характеризовали состояние фотосинтетического аппарата хвои сосны сибирской в поясном градиенте [31]. Снижение F_v/F_m и увеличение NPQ отмечали у хвои *Pinus sylvestris* [10] и *Abies alba* [9] в условиях длительной засухи. Поражение хвои ели обыкновенной патогеном *Chrysomyxa rhododendri* вызывало снижение F_v/F_m , что обусловлено закрытием устьиц и уменьшением содержания фотосинтетических пигментов [32]. Угнетение ETR хвои подростка *A. sibirica* наблюдали уже на первые сутки после инокуляции стволов культурой гриба-симбионта полиграфа уссурийского *G. aoshimae* [33].

Проведённые нами исследования показали, что существенное снижение величин параметров флуоресценции Хл происходило

у деревьев КСС IV и выше. Однако необходимо отметить, что у хвои деревьев КСС II–III разброс величин параметров флуоресценции заметно возрастал с увеличением степени усыхания, несмотря на стабильное содержание фотосинтетических пигментов. Скорее всего, это связано с ослаблением функционирования фотосинтетического аппарата из-за нарушения проводящей системы поражённых деревьев и, как следствие, водного режима. Известно, что недостаток воды вызывает закрытие устьиц, снижая ассимиляцию CO_2 и подавляя фотосинтез, что отражается в изменениях параметров флуоресценции Хл хвойных растений [34]. Сильный дефицит влаги почвы приводил к двукратному снижению F_v/F_m хвои *A. alba* из-за развивающейся эмболии сосудов ксилемы [35]. О нарушении водного режима в хвое КСС II–III косвенно свидетельствовала тенденция к увеличению NPQ. Повышение NPQ – важный механизм защиты фотосинтетического аппарата от фотоокислительного стресса [36] и может расцениваться как адаптивная реакция, вызванная началом усыхания поражённых деревьев.

В целом, полученные результаты указывают на перспективность использования параметров флуоресценции Хл на ранних этапах усыхания пихты. В литературе также показана взаимосвязь параметров флуоресценции Хл со спектральными индексами отражения, чувствительными к изменениям эффективности использования энергии света в процессе фото-

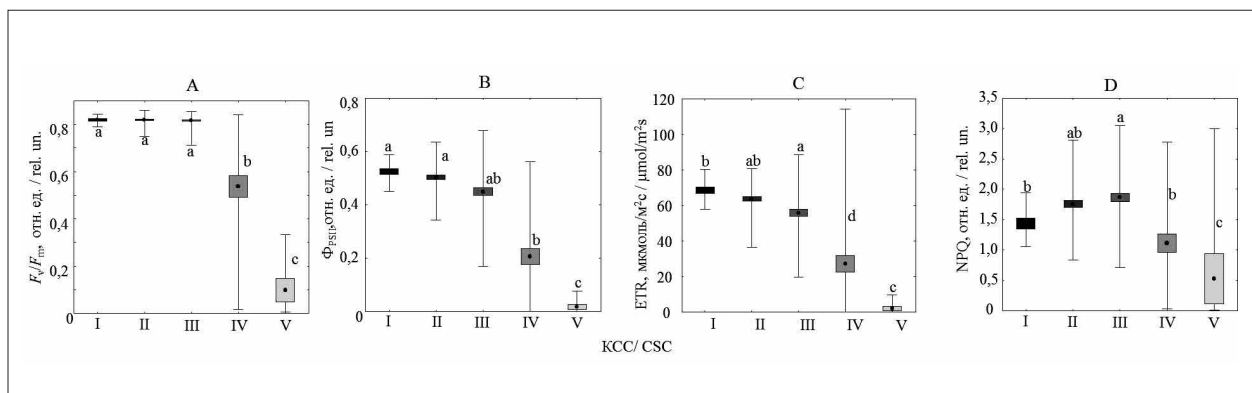


Рис. 2. Величины максимального (A) и реального квантового выхода (B), скорости транспорта электронов (C) и коэффициента нефотохимического тушения хлорофилла (D) ФСII хвои деревьев разных категорий КСС. Представлены средние арифметические значения (●), стандартные ошибки (□) и минимальные и максимальные значения (бары).

Разными латинскими буквами обозначена статистическая значимость различий между величинами параметра в зависимости от КСС (ANOVA, критерий Тьюки, $P \leq 0,05$)

Fig. 2. Dynamics of maximal (A) and actual quantum yield (B), electron transport rate (C) and non-photochemical quenching coefficient (D) in PSII of the needles of trees from different categories of sanitary condition (CSC). Means (●), standard errors (□), and minimal and maximal values are shown. Latin letters indicate statistically significant differences in the parameter values depending on the trees' CSC (ANOVA, Tukey's HSD test, $P \leq 0.05$)

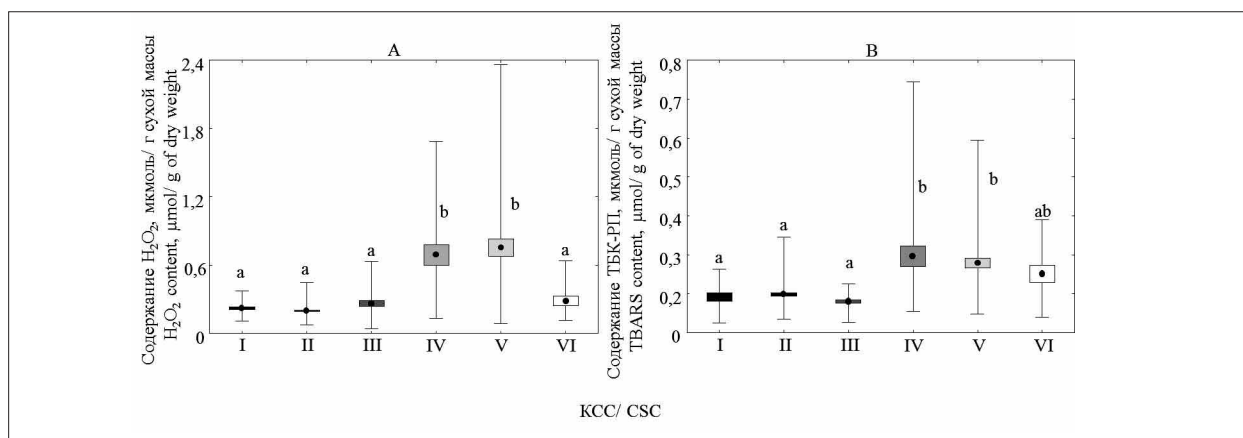


Рис. 3. Содержание пероксида водорода (А) и продуктов липопероксидации (ТБК-РП) (В) в хвое деревьев разных КСС. Разными латинскими буквами обозначена статистическая значимость различий между величинами параметра в зависимости от КСС (критерий Краскела-Уоллиса, $P \leq 0,05$). Остальные обозначения, как на рисунке 2
Fig. 3. Content of hydrogen peroxide (A) and lipid peroxidation products (TBARS) (B) in the needles of different trees' CSC. Latin letters indicate statistically significant differences between the parameter values depending on the CSC (Kruskal-Wallis test, $P \leq 0.05$). Other designations are as in figure 2

синтеза, к примеру, такими как PRI [9, 10] и EVI [11]. Выявлена высокая чувствительность индекса EVI при идентификации деревьев ели, атакованных короедом типографом (*Ips typographus* L.) [11].

Уровень окислительного стресса. Содержание H₂O₂ и продуктов ПОЛ в хвое пихты первых трёх КСС были стабильно пониженными, варьируя в диапазоне 0,19–0,23 мкмоль/г сухой массы (рис. 3). При этом с увеличением КСС разброс между минимальными и максимальными значениями параметров возрастал. У деревьев КСС IV–V **концентрация прооксидантов** в хвое существенно возрастала и достигала максимальных значений (рис. 3). Особи КСС VI характеризовались снижением как средних, так и максимальных величин исследуемых параметров.

Содержание H₂O₂ и уровень ПОЛ являются маркерами развития окислительного стресса. Усиление окислительных реакций у разных видов хвойных выявлено при действии высокотемпературного стресса и засухи [13, 37], а также при поражении насекомыми [38, 39]. Тенденция к увеличению значений ПОЛ и содержания H₂O₂ у особей КСС II–III свидетельствовала о возникновении сигналов для индукции защитных механизмов [14, 18]. Повышение уровня прооксидантов в хвое деревьев КСС IV указывало как на развитие окислительного стресса и, как следствие, нарушение метаболизма (об этом свидетельствовало ослабление фотосинтетической функции), так и на усиление «сигнализации» об ухудшении жизнеспособности для обеспечения

антиоксидантной защиты. На стадии КСС VI значения исследуемых параметров резко снижались, что было признаком прекращения жизненных процессов и отмирания дерева.

В литературе имеются пока единичные данные о связи содержания прооксидантов с вегетационными индексами. Так, разработана и апробирована модель для определения содержания ТБК-РП у проростков двух видов сосны на основе данных спектров отражения хвои в ближней ИК-области, для быстрой и неинвазивной оценки уровня окислительного стресса в условиях засухи [13]. Подбор и оценка новых спектральных индексов для выявления развития окислительного стресса у древесных пород является перспективным направлением для ранней диагностики очагов повреждений вредителями.

Заключение

Результаты проведённых исследований показали, что физиолого-биохимические показатели, характеризующие состояние фотосинтетического аппарата и уровень окислительного стресса хвои *A. sibirica*, могут быть использованы в качестве маркеров усыхания деревьев, поражённых *P. proximus* в пихтовых насаждениях хвойно-широколиственных лесов Пермского края. Характер изменения параметров зависел от КСС деревьев. Хвоя деревьев первых стадий усыхания (КСС II–III) **характеризовалась стабильным содержанием фотосинтетических пигментов и их соотношений**, типичных для здоровых

деревьев. Однако особи этих КСС уже продемонстрировали снижение параметров флуоресценции Хл (Ф_{PSII} и ETR), свидетельствующее об ослаблении фотосинтетической функции. Вместе с тем, усиление процессов энергодиссипации в ФСII и накопление прооксидантов в хвое на ранних этапах усыхания деревьев указывало на усиление адаптивной стратегии поддерживать функциональную активность фотосинтетического аппарата и сигнальной системы для защиты от окислительного стресса. С повышением степени усыхания хвоя демонстрировала очевидные признаки деградации фотосинтетического аппарата и развития окислительных реакций. В бурой хвое деревьев КСС VI снижение содержания АФК и отсутствие световых реакций фотосинтеза свидетельствует о прекращении жизненных процессов и отмирании дерева. Полученные результаты могут быть использованы для подбора и обоснования использования вегетационных индексов отражения, применяемых в дистанционных методах для диагностики ранних симптомов поражения *A. sibirica* поллиграфом уссурийским.

Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 24-76-10057 «Исследование по оперативному автоматизированному выявлению усыханий елово-пихтовых древостоев с применением геоинформационных технологий».

References

1. Chebakova N.M., Bazhina E.V., Parfenova E.I., Senashova V.A. In search of an X factor: A review of publications on the issue of dark-needled forest decline/dieback in Northern Eurasia // Russ. Meteorol. Hydrol. 2022. V. 47. P. 405–417. doi: 10.3103/S1068373922050090
2. Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Dvinskaya M.L., Shushpanov A.S., Golyukov A.S. Climate-driven conifer mortality in Siberia // Global Ecology and Biogeography. 2021. V. 30. No. 2. P. 543–556. doi: 10.1111/geb.13243
3. Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Volkova E.S., Astapenko S.A., Efremenko A.A., Kosilov A.Yu., Kudryavtsev P.P., Kuznetzova Yu.P., Ponomarev V.I., Potapkin A.B., Taraskin E.G., Titova V.V., Shilonosov A.O., Baranchikov Yu.N. Overview of the current secondary range of the four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in the Russian Federation // Russian Journal of Biological Invasions. 2024. V. 17. No. 1. P. 49–69 (in Russian). doi: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69
4. Zhila S.V., Furyaev I.V., Kovaleva N.M. Assessment of stocks of forest combustible materials in fir stands, damaged by the four-eyed fir bark beetle in Krasnoyarsk Krai // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2023. No. 6. P. 76–84 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20230608
5. Saltsevich Yu.V., Buryak L.V., Golovina A.N., Kuvavskaya E.A. Assessment of the state of forest disturbed by fires, logging, and insects in the foothills of the Eastern Sayan Mountains // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2023. No. 6. P. 63–75 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20230607
6. Ivanchina L.A., Rotermel' E.E., Bol'shakov E.G., Shilonosov A.O. The influence of the type of forest on the resistance of fir stands in the southern taiga subzone of Perm Krai to colonization by the four-eyed fir bark beetle // Geographical Bulletin. 2025. No. 2 (73). P. 130–140 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2025-2-130-140
7. Kerchev I.A. Ecology of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera; Curculionidae, Scolytinae) in the west Siberian region of invasion // Russ. J. Biol. Invasions. 2014. V. 5. P. 176–185. doi: 10.1134/S2075111714030072
8. Ecke S., Dempewolf J., Frey J., Schwaller A., Endres E., Klemmt H.-J., Tiede D., Seifert T. UAV-based forest health monitoring: A systematic review // Remote Sens. 2022. V. 14. Article No. 3205. doi: 10.3390/rs14133205
9. Peguero-Pina J.J., Camarero J.J., Abadía A., Martín E., González-Cascón R., Morales F., Gil-Pelegrín E. Physiological performance of silver-fir (*Abies alba* Mill.) populations under contrasting climates near the southwestern distribution limit of the species // Flora. 2007. V. 202. P. 226–236. doi: 10.1016/j.flora.2006.06.004
10. D'Odorico P., Schönbeck L., Vitali V., Meusbürger K., Schaub M., Ginzler C., Zweifel R., Velasco V.M.E., Gislér J., Gessler A., Ensminger I. Drone-based physiological index reveals long-term acclimation and drought stress responses in trees // Plant Cell Environ. 2021. V. 44. No. 11. P. 3552–3570. doi: 10.1111/pce.14177
11. Trubin A., Kozhoridze G., Zabihi K., Modlinger R., Singh V.V., Surový P., Jakuš R. Detection of susceptible Norway spruce to bark beetle attack using PlanetScope multispectral imagery // Front. For. Glob. Change. 2023. V. 6. Article No. 1130721. doi: 10.3389/ffgc.2023.1130721
12. Richardson A.D., Berlyn G.P., Gregoire T.G. Spectral reflectance of *Picea rubens* (Pinaceae) and *Abies balsamea* (Pinaceae) needles along an elevational gradient, Mt. Moosilauke, New Hampshire, USA // Am. J. Bot. 2001. V. 88. No. 4. P. 667–676. doi: 10.2307/2657067
13. Zhang Y., Luan Q., Jiang J., Li Y. Prediction and utilization of malondialdehyde in exotic pine under drought stress using near-infrared spectroscopy // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. Article No. 735275. doi: 10.3389/fpls.2021.735275
14. Foyer C.H., Noctor G. Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria // Physiologia Plantarum. 2003. V. 119. No. 3. P. 355–364. doi: 10.1034/j.1399-3054.2003.00223.x

15. Golovko T.K., Silina E.V., Lashmanova E.A., Kozlovskaya A.V. Reactive oxygen species and antioxidants in living systems: An integrative review // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026
16. Garmash E.V., Velegzhaninov I.O., Grabelnykh O.I., Borovik O.A., Silina E.V., Voinikov V.K., Golovko T.K. Expression profiles of genes for mitochondrial respiratory energy-dissipating systems and antioxidant enzymes in wheat leaves during de-etiolation // *J. Plant Physiol.* 2017. V. 215. P. 110–121. doi: 10.1016/j.jplph.2017.05.023
17. Shelyakin M.A., Silina E.V., Golovko T.K. Age and adaptive changes in pro-/antioxidant metabolism indicators and respiration of the winter-green herbaceous plant *Ajuga reptans* L. in natural conditions of the taiga zone // *Russ. J. Plant Physiol.* 2024. V. 71. Article No. 31. doi: 10.1134/S1021443724604397
18. Gechev T.S., Van Breusegem F., Stone J.M., Denev I., Laoli C. Reactive oxygen species as signals that modulate plant stress responses and programmed cell death // *BioEssays*. 2006. V. 28. No. 11. P. 1091–1101. doi: 10.1002/bies.20493
19. Mubarakshina M.M., Ivanov B.N., Naydov I.A., Hillier W., Badger M.R., Krieger-Liszkay A. Production and diffusion of chloroplastic H₂O₂ and its implication to signalling // *J. Exp. Bot.* 2010. V. 61. No. 13. P. 3577–3587. doi: 10.1093/jxb/erq171
20. Safonova A., Tabik S., Alcaraz-Segura D., Rubtsov A., Maglinets Yu., Herrera F. Detection of fir trees (*Abies sibirica*) damaged by the bark beetle in unmanned aerial vehicle images with deep learning // *Remote Sens.* 2019. V. 11. Article. 643. doi: 10.3390/rs11060643
21. Volkova E.S., Kerchev I.A., Krivets S.A., Melnik M.A. Experience of mapping invasions by forest alien pest insects in Western Siberia using GIS tools // *Geography and Natural Resources*. 2023. V. 44. No. S5. P. 146–153 (in Russian). doi: 10.15372/GIPR20230518
22. Ivanchina L.A., Shilonosov L.A., Shikhov A.N. Estimation of drying out of dark coniferous forests caused by the spread of the four-eyed fir bark beetle in Perm Krai based on satellite and field observations // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2025. V. 22. No. 3. P. 149–160 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-149-160
23. Goltsev V.N., Kalaji H.M., Paunov M., Bąba W., Horaczek T., Mojski J., Kociel H., Allakhverdiev S.I. Variable chlorophyll fluorescence and its use for assessing physiological condition of plant photosynthetic apparatus // *Russ. J. Plant Physiol.* 2016. V. 63. P. 869–893. doi: 10.1134/S1021443716050058
24. 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
25. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // *Arch. Biochem. Biophys.* 1968. V. 125. No. 1. P. 189–198. doi: 10.1016/0003-9861(68)90654-1
26. Bellincampi D., Dipierro N., Salvi G., Cervone F., De Lorenzo G. Extracellular H₂O₂ induced by oligogalacturonides is not involved in the inhibition of the auxin-regulated *rolB* gene expression in tobacco leaf explants // *Plant Physiol.* 2000. V. 122. No. 4. P. 1379–1386. doi: 10.1104/pp.122.4.1379
27. Golovko T.K., Yatsko Ya.N., Dymova O.V. Seasonal changes in the state of the photosynthetic apparatus of three boreal coniferous species in the middle taiga subzone of the European Northeast // *Hvojninye boreal'noj zony*. 2013. V. 31. No. 1–2. P. 73–78 (in Russian).
28. Dymova O.V., Golovko T.K. Plant pigments: Biological, ecological, and evolutionary aspects (an overview) // *Journal of General Biology*. 2025. V. 86. No. 5. P. 361–380 (in Russian). doi: 10.31857/S0044459625050047
29. Latowski D., Dymova O., Maslova T., Strzałka K. The xanthophylls cycle and its physiological functions // *Photosynthetic pigments: chemical structure, biological function and ecology* / Eds. T.K. Golovko, E.I. Gruszecki, M.N.V. Prasad, K. Strzałka. Syktyvkar: Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2014. P. 183–206 (in Russian).
30. Masaitis G., Mozgeris G., Augustaitis A. Spectral reflectance properties of healthy and stressed coniferous trees // *iForest*. 2013. V. 6. No. 1. P. 30–36. doi: 10.3832/ifer0709-006
31. 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).
32. Ganthaler A., Bauer H., Gruber A., Mayr M., Oberhuber W., Mayr S. Effects of the needle bladder rust (*Chrysomyxa rhododendri*) on Norway spruce: implications for subalpine forests // *Eur. J. Forest Res.* 2014. V. 133. P. 201–241. doi: 10.1007/s10342-013-0770-6
33. Pakharkova N.V., Kisteeva M.O. Changes in photosynthetic activity of Siberian fir needles upon infection by ophiostomatoid fungi – associates of the four-eyed fir bark beetle // *Monitoring sostoyaniya prirodnyh kompleksov i mnogoletnie issledovaniya na osobo ohranyaemyh prirodnyh territoriyah*. 2019. No. 3. P. 84–88 (in Russian).
34. Perks M.P., Monaghan S., O'Reilly C., Osborne B., Mitchell D.T. Chlorophyll fluorescence characteristics, performance and survival of freshly lifted and cold stored Douglas fir seedlings // *Ann. For. Sci.* 2001. V. 58. P. 225–235. doi: 10.1051/forest:2001122
35. Gil-Pelegrín E., Peguero-Pina J.J., Sancho-Knapik D., Arrechea E., Camarero J.J. How warmer and

drier conditions drive forest dieback and tree death: A review and conceptual model for silver fir // *Plants*. 2025. V. 14. Article No. 3308. doi: 10.3390/plants14213308

36. Ruban A.V., Johnson M.P., Duffy C.D.P. The photoprotective molecular switch in the photosystem II antenna // *Biochim. Biophys. Acta*. 2012. V. 1817. No. 1. P. 167–181. doi: 10.1016/j.bbabi.2011.04.007

37. Pliūra A., Bajerkevičienė G., Labokas J., Lygis V., Jankauskienė J., Suchockas V., Verbylaitė R. The effects of different combinations of simulated climate change-related stressors on juveniles of seven forest tree species grown as mono-species and mixed cultures //

Baltic Forestry. 2020. V. 26. No. 1. Article No. 326. doi: 10.46490/BF326

38. Felicijan M., Novak M., Kravec N., Urbanek Krajnc A. Antioxidant defences of Norway spruce bark against bark beetles and its associated blue-stain fungus // *Agricultura*. 2015. V. 12. No. 1–2. P. 9–18. doi: 10.1515/agricultura-2016-0002

39. Netherer S., Kandasamy D., Jirosová A., Kalinová B., Schebeck M., Schlyter F. Interactions among Norway spruce, the bark beetle *Ips typographus* and its fungal symbionts in times of drought // *Journal of Pest Science*. 2021. V. 94. P. 591–614. doi: 10.1007/s10340-021-01341-y

Изучение сорбции ионов кобальта из воды раковинной моллюска *Lissachatina fulica*

© 2026. Н. А. Воронин, преподаватель, В. А. Сомин, д. т. н., зав. кафедрой, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, д. 46, e-mail: voroninna00@gmail.com

Соединения кобальта являются одними из наиболее токсичных загрязнений водных объектов, которые могут попадать в них вследствие сбросов недостаточно очищенных сточных вод предприятий машиностроения и химической промышленности. В природной среде кобальт накапливается в тканях растений и животных и по трофической цепи может попасть в организм человека, вызывая токсическое и мутагенное воздействие. В связи с этим важным является использование технологий, позволяющих эффективно извлекать кобальт из воды различными материалами. В данной работе представлены результаты исследований по изучению сорбции кобальта из воды раковинной моллюска *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821). Для исследований использовали предварительно отмытые и измельченные на щёковой дробилке раковины с размерами частиц от 2 до 5 мм, как в нативном виде, так и модифицированные раствором гидроксида натрия с концентрацией 10 % и обработанные ультразвуком частотой 40 кГц. Для всех материалов определена статическая сорбционная ёмкость, которая составила для нативного материала 37 мг/г, модифицированного гидроксидом натрия – 31 мг/г, модифицированного ультразвуком – 17 мг/г. Построены линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта по моделям Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Тёмкина. Рассчитаны константы сорбционного равновесия и величины предельной сорбции по указанным моделям. Выявлено, что сорбция ионов кобальта удовлетворительно описывается моделями Ленгмюра, Фрейндлиха и Тёмкина как для нативного материала, так и для модифицированного и имеет физический характер. Модель Дубинина-Радушкевича не подходит для описания сорбции исследуемых материалов (коэффициент корреляции составил менее 0,2). Проведение активации нативного материала гидроксидом натрия и ультразвуком нецелесообразно, поскольку приводит к снижению сорбционной ёмкости материала в 1,2 и 2,2 раза соответственно.

Ключевые слова: адсорбция, ионы кобальта, моллюски, загрязнение воды.

Study of cobalt ions' sorption from water by *Lissachatina fulica* shell

© 2026. N. A. Voronin ORCID: 0009-0004-5887-8796, V. A. Somin ORCID: 0000-0003-3276-5174,
Altai State Technical University named after I.I. Polzunov,
46, Lenin Ave., Barnaul, Russia, 656038,
e-mail: voroninna00@gmail.com

Cobalt compounds are among the most toxic pollutants of water bodies that can enter them due to discharges of insufficiently treated wastewater from engineering and chemical industries. In the environment cobalt accumulates in plant and animal tissues and can enter the human body through the trophic chain, causing toxic and mutagenic effects. In this regard, it is important to use technologies that effectively extract cobalt from water using various materials. This paper presents the results of studies on the cobalt sorption from water by the shell of the *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821) mollusk. For the research, a shell with geometric dimensions from 2 to 5 mm, pre-washed and crushed on a jaw crusher, was used both in its native form and modified with a sodium hydroxide solution with a concentration of 10 % and treated with ultrasound at a frequency of 40 kHz. A static sorption capacity was determined for all materials, which was 37 mg/g for native material, 31 mg/g modified with sodium hydroxide, and 17 mg/g modified with ultrasound. Linearized isotherms of sorption of cobalt ions are constructed according to the Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radostkevich, and Temkin models. The sorption equilibrium constants and the values of the limiting sorption are calculated according to these models. It is revealed that the sorption of cobalt ions is satisfactorily described by the Langmuir, Freundlich, and Temkin models for both native and modified shells and has a physical character. The Dubinin-Radostkevich model is not suitable for describing the sorption of the studied materials, since the correlation coefficient was less than 0.2. Activation with sodium hydroxide and ultrasound is impractical, since it leads to a decrease in the sorption capacity of the material by 1.2 and 2.2 times, respectively.

Keywords: adsorption, cobalt ions, shellfish, water pollution.

Соединения тяжёлых металлов (ТМ) при попадании в окружающую среду могут аккумулироваться в организмах и приводить к нарушениям обменных процессов, функционирования иммунной и других систем [1]. Кобальт относится к числу наиболее распространённых ТМ, загрязняющих биосферу вследствие сбросов недостаточно очищенных сточных вод предприятий машиностроения, химической промышленности. В природной среде соединения кобальта могут накапливаться в тканях растений [2–6], донных отложениях водоёмов [7,8], рыбе, особенно её костной ткани [9], а также в моллюсках [10]. Накопление кобальта в живых организмах приводит к изменению биохимических процессов в них и, как следствие, к снижению биоразнообразия экосистем.

Естественная способность моллюсков и ракообразных накапливать ТМ, вероятно, обусловлена наличием в них хитина, который может выступать в роли биополимера с высокой способностью к поглощению поллютантов [11–15], что может быть основанием для получения на их основе сорбционных материалов для удаления металлов из воды.

Цель данной работы – изучение преобладающего механизма сорбции ионов кобальта раковиной моллюска *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821).

Объекты и методы исследования

Авторами изучался процесс сорбции ионов кобальта на нативных и модифицированных раковинах сухопутного моллюска ахатины гигантской *Lissachatina fulica* (Férussac, 1821). В отечественной и зарубежной литературе практически отсутствуют сведения о сорбционной способности в отношении ионов ТМ раковинами этого моллюска. Вместе с тем, данный вид широко распространён в Африке, Евразии, Северной и Южной Америке. В настоящее время *L. fulica* часто разводится любителями в домашних условиях. При отмирании моллюсков остаётся значительное количество раковин, не находящихся применения в каком-либо производстве. В связи с этим, изучение сорбции кобальта раковинами *L. fulica* представляет актуальную научную задачу. В исследованиях использовали раковины моллюсков, выращенных в лабораторных условиях и не испытывающих влияния загрязнения окружающей среды соединениями металлов. Предварительно раковины отмывали водой и просушивали, после чего измельчали на

щёковой дробилке и просеивали на вибросите. Для изучения сорбционных характеристик отбирали фракцию с размером частиц 2–5 мм. Отдельно проводили модифицирование раковин двумя способами – выдерживанием в растворе гидроксида натрия с концентрацией 10 % в течение 60 мин и активацию ультразвуком частотой 40 кГц в течение 20 мин.

Изучение сорбционной способности проводили на модельных растворах сульфата кобальта, который готовили растворением навески кристаллогидрата $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в дистиллированной воде. Концентрацию ионов кобальта в растворах определяли фотометрически согласно ПНД Ф 14.1:2.44-96. Сорбционная ёмкость в статических условиях определялась на растворах с концентрацией ионов кобальта от 10 до 2500 мг/дм³ при постоянной температуре. Выбор верхнего предела изучаемых концентраций (2500 мг/дм³) обусловлен достижением при этой концентрации предельной сорбционной ёмкости.

В колбы с раствором сульфата кобальта объёмом 0,1 дм³ добавляли по 1 г сорбента в воздушно-сухом состоянии и перемешивали их в течение 60 мин до установления химического равновесия. Количество поглощённых ионов кобальта высчитывали по разнице между исходными и равновесными концентрациями в жидкой фазе.

Величину сорбционной ёмкости (А) высчитывали по формуле:

$$A = \frac{(C_s - C_e)V}{m} \quad (1)$$

где C_s – начальная концентрация ионов кобальта в растворе, мг/дм³; C_e – равновесная концентрация сорбата, мг/дм³; m – масса навески раковин, г; V – объём раствора (0,1 дм³).

В параллельных экспериментах относительная погрешность между полученными данными составляла не более 30 %. Для полученных в результате исследований данных рассчитывали стандартное среднеквадратическое отклонение.

Результаты и обсуждение

Процесс адсорбции раковинами моллюсков металлов, в частности кобальта, является сложным для описания, поскольку в состав раковин, помимо минеральной части, чаще всего представленной кальцитом, входит несколько сложных органических соединений, в частности полисахариды (хитин), липиды и белки (конхиолин), углеводы [16].

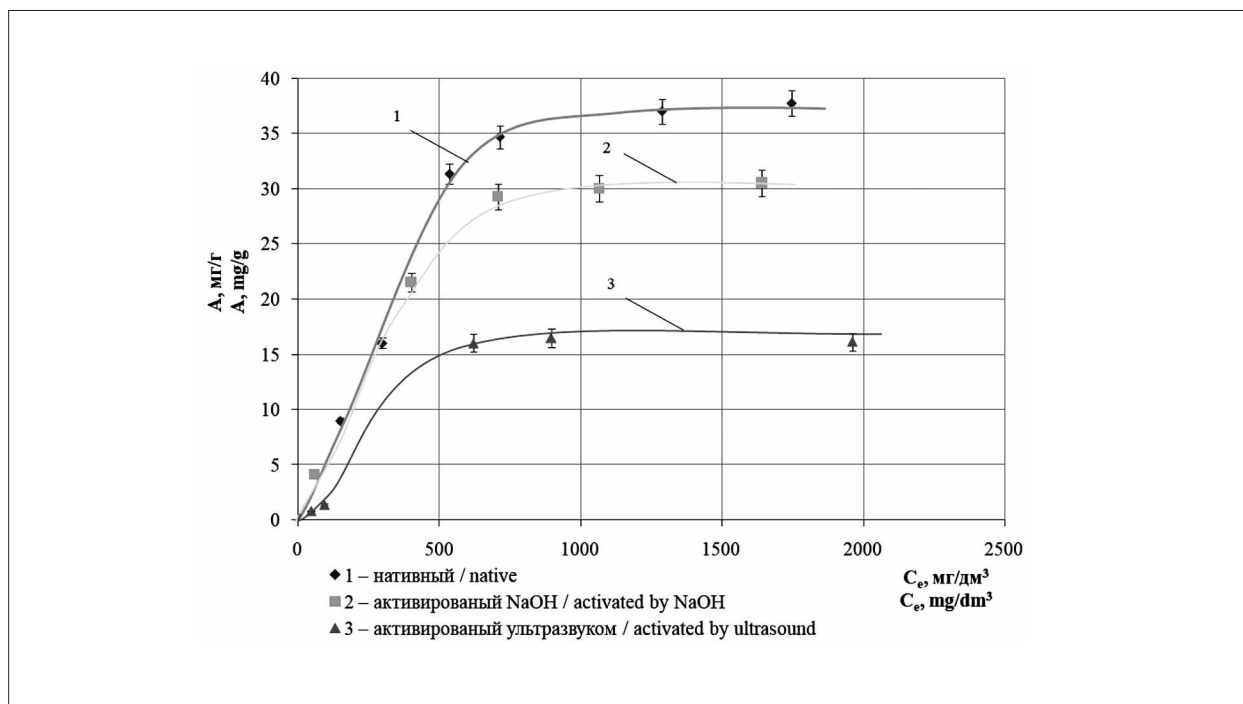


Рис. 1. Зависимость сорбционной ёмкости (A) от равновесной концентрации (C_e) ионов кобальта на раковинах моллюска *L. fulica*
Fig. 1. Dependence of the sorption capacity (A) on the cobalt ions' equilibrium concentration (C_e) on *L. fulica* shell

Полученные экспериментальные данные по сорбции ионов кобальта раковинами *L. fulica* были использованы для построения изотерм сорбции (рис. 1).

Как видно из рисунка 1, нативный материал обладает наиболее высокой сорбционной ёмкостью по отношению к кобальту (37 мг/г), активация гидроксидом натрия уменьшает её до 30 мг/г, а ультразвуком – до 17 мг/г. Снижение ёмкости модифицированных сорбентов может быть связано с потерей активных центров, ответственных за связывание ионов металлов, в структуре раковин при модификации. Полученные изотермы имеют резко возрастающий характер при низких равновесных концентрациях, что предполагает сильное межмолекулярное взаимодействие в веществе сорбата и позволяет отнести их к типу L2 по классификации Гильса [17].

При исследовании механизма адсорбции следует отметить сложившуюся тенденцию использования нескольких моделей, что позволяет более объективно характеризовать явления на границе сорбент-сорбат. Описание сорбционного процесса проводилось с применением моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина-Радушкевича и Тёмкина. Адекватность моделей оценивали по величине коэффициента аппроксимации R².

Описание процесса сорбции с использованием изотермы Ленгмюра основано на предположении, что элементарные участки, имеющиеся на поверхности адсорбента, могут сорбировать только одну молекулу сорбата, а количество сорбционных центров эквивалентно количеству сорбируемого вещества. Процесс при этом является обратимым и равновесным. Уравнение Ленгмюра обычно используют в следующем виде:

$$A = \frac{A_{\infty} \cdot K_L \cdot C_e}{(1 + K_L \cdot C_e)} \quad (2)$$

где A – сорбционная ёмкость, мг/г, C_e – равновесная концентрация сорбата, мг/дм³; K_L – константа сорбционного равновесия, характеризующая интенсивность сорбции, дм³/мг; A_∞ – предельное количество сорбированного вещества, мг/г.

Уравнение (2) линеаризуется в координатах 1/A = f(1/C_e) и может быть представлено следующим образом:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_{\infty}} + \frac{1}{K_L \cdot A \cdot C_e} \quad (3)$$

В результате обработки экспериментальных данных по модели Ленгмюра были получены зависимости, представленные на рисунке 2.

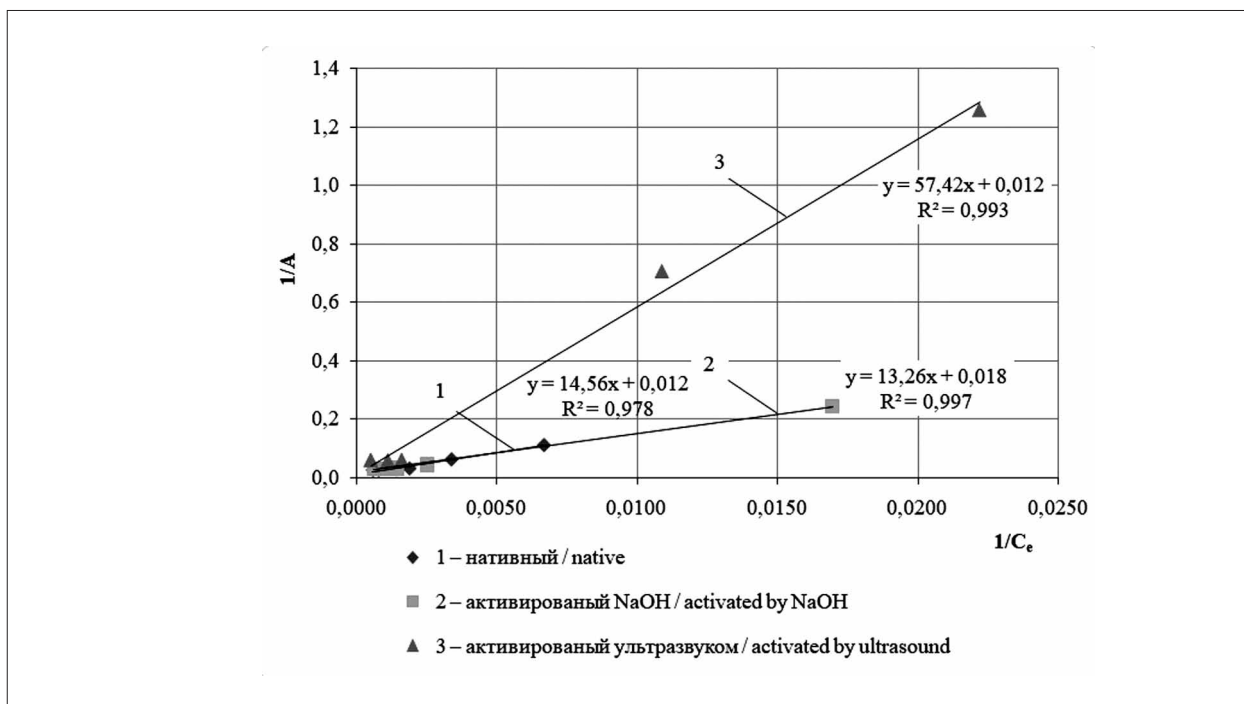


Рис. 2. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Ленгмюра
 Fig. 2. Linearized isotherms of cobalt ions sorption by *L. fulica* shell

Таблица 1 / Table 1

Рассчитанные значения максимальной сорбционной ёмкости (A_{∞}) и константы сорбционного равновесия (K_L) по модели Ленгмюра / Calculated values of the maximum sorption capacity (A_{∞}) and the sorption equilibrium constant (K_L) according to the Langmuir model

| Вид материала / Type of material | A_{∞} , мг/г / mg/g | K_L , дм ³ /мг / dm ³ /mg |
|---|----------------------------|---|
| Нативный / Native | 80,6 | 0,0009 |
| Активированный NaOH / Activated by NaOH | 53,2 | 0,0014 |
| Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound | 82,6 | 0,0002 |

Как видно из рисунка 2, значения коэффициента аппроксимации R^2 линейных зависимостей достаточно высоки, что позволяет предполагать мономолекулярный характер сорбции, значения рассчитанных при этом максимальной адсорбции и константы сорбционного равновесия приведены в таблице 1.

Рассчитанные значения максимальной адсорбции A_{∞} (табл. 1) для всех изученных сорбционных материалов оказались значительно выше экспериментально найденных (рис. 1). Константы адсорбционного равновесия K_L оказались невысокими, что характеризует слабое взаимодействие ионов кобальта с адсорбентом.

Модель Фрейндлиха используется для описания сорбции на гетерогенной поверхности и исходит из предположения, что сорбционные центры обладают различными величинами энергии и в первую очередь происходит заполнение тех из них, которые обладают

максимальной энергией. Данная модель математически выражается следующим образом:

$$A = K_F \cdot C_e^n, \quad (4)$$

где K_F – константа равновесия уравнения Фрейндлиха, которая отражает относительную сорбционную способность, n – параметр, указывающий на интенсивность взаимодействия адсорбент-адсорбат.

Уравнение 4 линеаризуется в координатах $\lg A = f(\lg C_e)$ и может быть представлено в виде:

$$\lg A = \lg K_F + n \cdot \lg C_e. \quad (5)$$

Построенные в координатах $\lg A$ от $\lg C_e$ линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта на нативных и модифицированных раковинах моллюска представлены на рисунке 3.

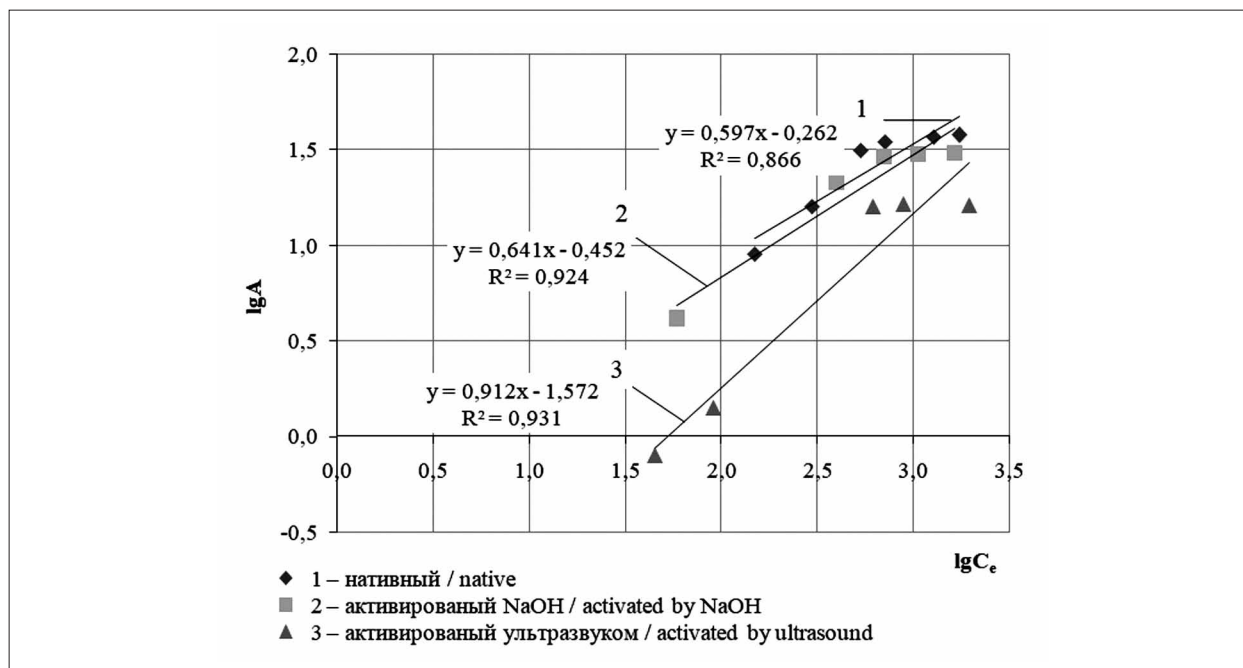


Рис. 3. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Фрейндлиха
 Fig. 3. Linearized isotherms of cobalt ions' sorption by *L. fulica* shell according to the Freundlich model

Таблица 2 / Table 2

Рассчитанные значения константы сорбционного равновесия K_F и параметра n по модели Фрейндлиха / Calculated values of the sorption equilibrium constant K_F and parameter n according to the Freundlich model

| Вид материала / Type of material | K_F | n | $1/n$ |
|---|-------|-------|-------|
| Нативный / Native | 0,547 | 1,673 | 0,60 |
| Активированный NaOH / Activated by NaOH | 2,837 | 1,559 | 0,64 |
| Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound | 0,027 | 1,096 | 0,91 |

Рассчитанная константа сорбционного взаимодействия K_F значительно больше у активированного гидроксидом натрия материала, наименьшая – у активированного ультразвуком материала (табл. 2), что несколько противоречит полученным экспериментальным данным, т. к. наибольшая адсорбционная способность выявлена у нативных раковин.

Достаточно высокие значения коэффициентов аппроксимации свидетельствуют об удовлетворительном соответствии экспериментальных данных с теоретическими положениями модели Фрейндлиха. Для всех зависимостей рассчитанные значения коэффициента n оказались больше 1, что позволяет предполагать, что катионы кобальта в первую очередь заполняют сорбционные центры с более высокой связывающей способностью, и прочность сцепления уменьшается с увеличением степени заполнения. Значение параметра $1/n$ даёт представление о том, насколько

интенсивны процессы адсорбции: рассчитанные значения данного параметра находятся в диапазоне от 0,5 до 1,0, следовательно, процесс протекает довольно сложно [18]. При этом величину $1/n$ можно рассматривать как показатель неоднородности сорбционных центров и при приближении её к 1 их неоднородность возрастает. Из полученных данных видно, что наибольшей неоднородностью сорбционных центров обладает активированный ультразвуком материал.

Для процесса сорбции на твёрдых микропористых сорбентах используется модель Дубинина-Радушкевича, которая описывается уравнением 6 и линеаризуется в координатах $\ln A = f(\ln(C_s/C_e))^2$:

$$A = A_{\infty} \exp\left(-\frac{R \cdot T}{E} \frac{C_s}{C_e}\right)^2, \quad (6)$$

где C_s – начальная концентрация адсорбата, мг/дм³; R – универсальная газовая

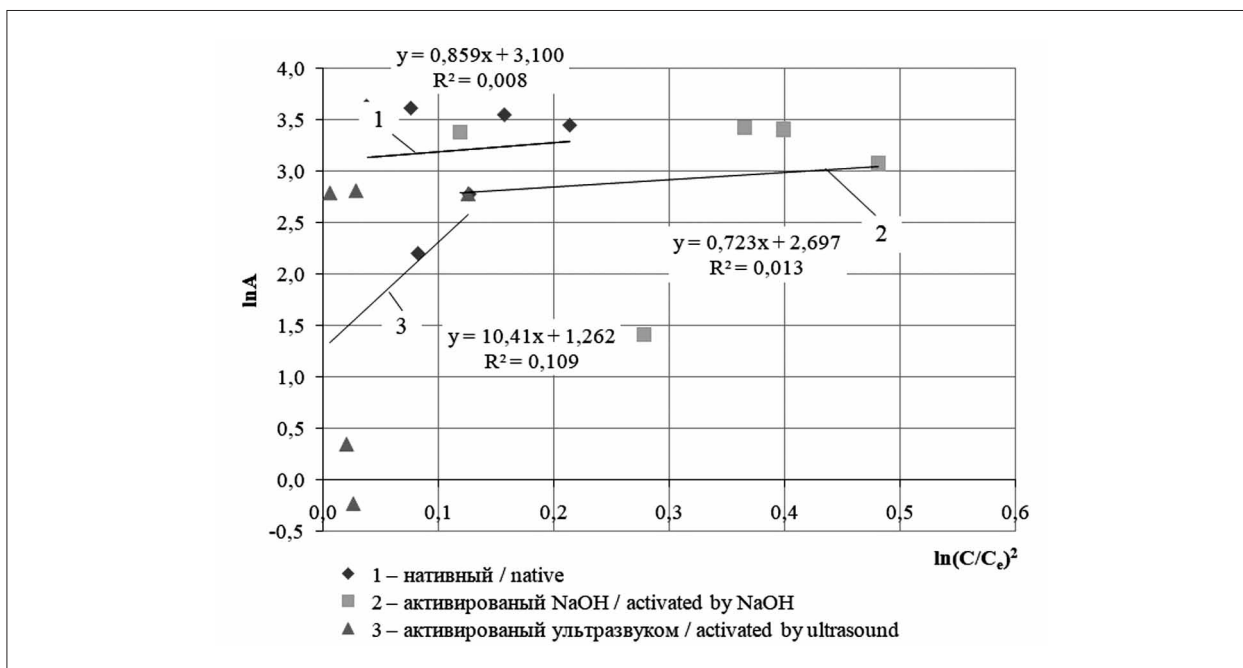


Рис. 4. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Дубинина-Радужкевича
Fig. 4. Linearized isotherms of cobalt ions' sorption by *L. fulica* shell according to the Dubinin-Radzhdankevich model

Таблица 3 / Table 3

Рассчитанные значения предельной адсорбции A_{∞} и энергии адсорбции E по модели Дубинина-Радужкевича / Calculated values of the limiting adsorption A_{∞} and the adsorption energy E according to the Dubinin-Radustkevich model

| Материал / Type of material | A_{∞} , мг/г / mg/g | E , кДж/моль / kJ/mol |
|---|----------------------------|-------------------------|
| Нативный / Native | 22,2 | 2691 |
| Активированный NaOH / Activated by NaOH | 3,5 | 773 |
| Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound | 14,8 | 2933 |

постоянная; T – абсолютная температура, K ; E – энергия адсорбции.

Модель позволяет установить физический или химический характер сорбции и является более общей по отношению к модели Ленгмюра, т. к. не предполагает гомогенности поверхности и постоянства адсорбционного потенциала. Обработка изотерм сорбции по модели Дубинина-Радужкевича позволяет определять природу адсорбционных сил, удерживающих частицы сорбата в порах сорбента, по величине вычисленной средней свободной энергии адсорбции [19].

Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта на нативном и модифицированном материале по модели Дубинина-Радужкевича представлены на рисунке 4.

Отмечено, что экспериментально полученные точки не укладываются в прямолинейную зависимость, коэффициенты корреляции составили от 0,0132 до 0,1092 (рис. 4). Таким

образом, сорбция катионов кобальта не может быть объяснена объёмным заполнением микропор в раковинах моллюсков. Тем не менее, для данной модели были рассчитаны значения предельной адсорбции и энергии адсорбции (табл. 3). Как видно, предельная адсорбция значительно меньше, чем зафиксированная экспериментально и полученная расчётным путём по модели Ленгмюра. Рассчитанная энергия адсорбции во всех случаях оказалась значительно больше 16 кДж/моль, что не позволяет использовать модель Дубинина-Радужкевича для изучаемых сорбционных материалов.

Модель Тёмкина относится к случаю мономолекулярной адсорбции на неоднородной поверхности адсорбента. Она предполагает, что теплота адсорбции всех молекул линейно снижается по мере заполнения слоя из-за отталкивания адсорбатом, при этом адсорбция происходит с равномерным распределением

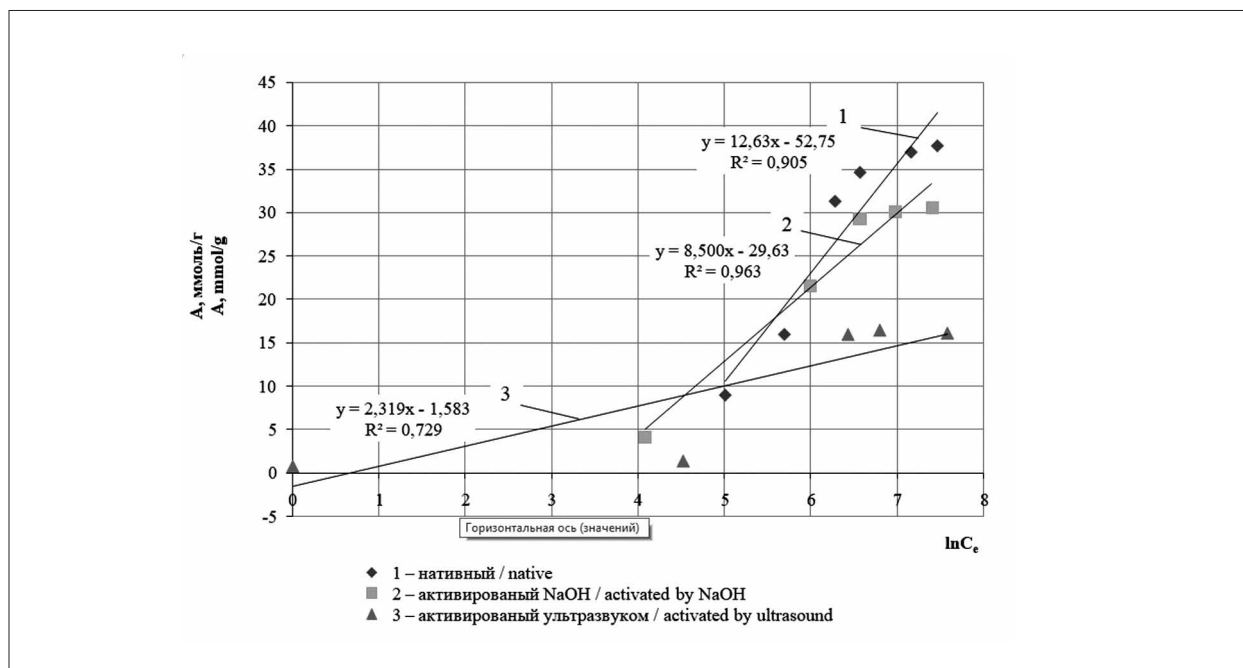


Рис. 5. Линеаризованные изотермы сорбции ионов кобальта раковинами моллюска *L. fulica* по модели Тёмкина
 Fig. 5. Linearized isotherms of cobalt ions' sorption by *L. fulica* shell according to the Temkin model

Таблица 4 / Table 4

Рассчитанные значения коэффициентов K_T и K по модели Тёмкина
 Calculated values of the coefficients K_T and K according to the Temkin model

| Вид материала / Type of material | K _T | K |
|---|----------------|--------|
| Нативный / Native | 0,015 | 197,5 |
| Активированный NaOH / Activated by NaOH | 0,031 | 293,4 |
| Активированный ультразвуком / Activated by ultrasound | 0,505 | 1075,3 |

максимальной энергии связывания. Кроме того, модель предполагает, что снижение теплоты адсорбции происходит в большей степени по линейному закону, чем по логарифмическому и в линеаризованном виде описывается следующим образом:

$$A = \frac{R \cdot T}{K} \ln K_T + \frac{R \cdot T}{K} \ln C_e, \quad (7)$$

где K – константа, характеризующая теплоту адсорбции (Дж/моль); K_T – константа Тёмкина (константа сорбционного равновесия, соответствующая максимальной энергии связывания), дм³/мг.

Построение изотерм сорбции в линейных координатах уравнения Тёмкина (рис. 5) показало неприменимость данной модели (коэффициент аппроксимации составил 0,73–0,96) для описания сорбции кобальта из водных растворов всеми образцами изученных материалов в области концентраций ионов кобальта 200–2100 мг/дм³. Теоретически рассчитанные

константы адсорбции K для каждого материала представлены в таблице 4. В расчётах температура была принята равной 300 К.

Невысокие значения коэффициента аппроксимации в линеаризованной форме изотермы (рис. 5) свидетельствуют о слабом взаимодействии между адсорбированными ионами кобальта и энергетической гетерогенностью адсорбционных центров.

Заключение

На основании проведённых исследований можно сделать вывод о возможности использования раковин моллюска *L. fulica* для извлечения ионов кобальта из воды. Проведение активации нативного сорбента гидроксидом натрия и ультразвуком нецелесообразно, поскольку приводит к снижению сорбционной ёмкости материала в 1,2 и 2,2 раза соответственно.

Сорбция ионов кобальта удовлетворительно описывается моделями Ленгмюра,

Фрейндлиха и Тёмкина как для нативного материала, так и для модифицированных и имеет физический характер. Модель Дубинина-Радушкевича не подходит для описания сорбции исследуемых материалов.

Литература

1. Гулиева С.В., Керимова Р.Дж., Юсифова М.Ю. Влияние тяжёлых металлов на биохимические процессы в организме человека // *Academy*. 2018. № 12 (39). С. 77–81.

2. Немерешина О.Н., Петрова Г.В., Филиппова А.В. Содержание кобальта и кадмия в тканях растений техногенной зоны // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 4 (52). С. 80–87. doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-80-87

3. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф. Накопление кобальта и кадмия в растительном сырье и почвах техногенных зон // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2020. № 3 (83). С. 122–126. doi: 10.37670/2073-0853-2020-83-3-122-126

4. Немерешина О.Н., Гусев Н.Ф. Особенности поглощения и распределения тяжёлых металлов из почвы и сточных вод в техногенной зоне в тканях растений // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2024. № 5 (109). С. 90–97. doi: 10.37670/2073-0853-2024-109-5-90-97

5. Науменко О.А., Соколова О.Я., Кабышева М.И., Бибарцева Е.В. Характеристика видовых особенностей накопления марганца, цинка и кобальта древесными растениями Оренбуржья // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2018. № 1 (69). С. 91–93.

6. Сибиркина А.Р., Лихачев С.Ф. Сравнение содержания соединений кобальта в органах и тканях древесных растений // *Самарский научный вестник*. 2017. Т. 6. № 2 (19). С. 84–87.

7. Чуйко Е.В. Влияние содержания тяжёлых металлов в донных отложениях на их биоаккумуляцию в ихтиофауне // *Астраханский вестник экологического образования*. 2013. № 3 (25). С. 139–144.

8. Макаренко Т.В., Никитин А.Н., Ерофеев М.А. Изучение содержания меди, кобальта и свинца в донных отложениях водоёмов г. Гомеля // *Эпоха науки*. 2020. № 21. С. 300–304. doi: 10.24411/2409-3203-2019-11061

9. Грибовский Ю.Г., Нохрин Д.Ю., Давыдова Н.А., Торчицкий А.Н. Содержание тяжёлых металлов в рыбе из минерализованных водоёмов Урала // *Российский журнал Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. 2019. № 4 (32). С. 461–467. doi: 10.25725/vet.san.hyg.ecol.201904019

10. Макаренко Т.В. Изучение накопления тяжёлых металлов в тканях моллюсков в водоёмах и водотоках Гомеля и прилегающих территорий // *Экологический вестник*. 2013. № 2. С. 116–121.

11. Тунакова Ю.А., Мухаметшина Е.С., Шмакова Ю.А. Исследование эффективности биополимерных сорбентов на основе хитина в отношении металлов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2011. № 14. С. 141–149.

12. Ловкис З.В., Павлова О.В., Белова Е.А., Трусова М.М. Использование хитозана для очистки природных и сточных вод // *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2023. Т. 16. № 1 (59). С. 53–61. doi: 10.47612/2073-4794-2023-16-1(59)-53-61

13. Реут К.В., Береза И.Г., Василевский П.Б., Деркач С.Р. Способ очистки сточных вод производства хитина из панциря ракообразных // *Патент RU 2263079 С1*. Заявление: 2004107962/15, 18.03.2004. Дата публикации: 27.10.2005.

14. Касьянов Г.И., Кубенко Е.Г. Разработка технологии получения хитозана из панциря гаммаруса азовского // *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*. 2013. № 1 (331). С. 69–72.

15. Солдатова С.Ю. Разработка технологии получения хитозана из панцирьсодержащего сырья // *Вестник Нижневартковского государственного университета*. 2015. № 1. С. 48–56.

16. de Paula S.M., Silveira M. Studies on molluscan shells: contributions from microscopic and analytical methods // *Micron*. 2009. V. 40. No. 7. P. 669–690. doi: 10.1016/j.micron.2009.05.006

17. Адсорбция из растворов на поверхностях твёрдых тел / под ред. Г. Парфита, К. Рочестера. М.: Мир, 1986. 488 с.

18. Халил А.С., Серпокровлов Н.С., Смоляниченко А.С., Старовойтов С.В. Математическое описание сорбции на модифицированной рисовой соломе // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 1 [Электронный ресурс] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650> (дата обращения 10.03.2025).

19. Шумилова М.А. Применение моделей адсорбции при исследовании поглощения ионов никеля почвой // *Теоретическая и прикладная экология*. 2024. № 3. С. 45–53. doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-045-053

References

1. Guliyeva S.V., Kerimova R.D., Yusifova M.Y. The influence of heavy metals on biochemical processes in the human body // *Academy*. 2018. No. 12 (39). P. 77–81 (in Russian)

2. Nemereshina O.N., Petrova G.V., Filippova A.V. Cobalt and cadmium content in plant tissues of technogenic zone // *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2020. No. 4(52). P. 80–87 (in Russian). doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-80-87

3. Nemereshina O.N., Gusev N.F. Accumulation of cobalt and cadmium in plants and soils of technogenic zones // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2020. No. 3 (83). P. 122–126 (in Russian). doi: 10.37670/2073-0853-2020-83-3-122-126

4. Nemereshina O.N., Gusev N.F. Features of absorption and distribution of heavy metals from soil and wastewater in the technogenic zone in plant tissues // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2024. No. 5 (109). P. 90–97 (in Russian). doi: 10.37670/2073-0853-2024-109-5-90-97
5. Naumenko O.A., Sokolova O.Ya., Kabysheva M.I., Bibartseva Ye.V. Specific features of manganese, zinc and cobalt accumulation by woody plants in the Orenburg region // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2018. No. 1 (69). P. 91–93 (in Russian).
6. Sibirkina A.R., Likhachev S.F. Comparison of cobalt compounds content in organs and tissues of woody plants // *Samara Journal of Science*. 2017. V. 6. No. 2 (19). P. 84–87 (in Russian).
7. Chuiko E.V. The influence of heavy metal content in bottom sediments on their bioaccumulation in ichthyofauna // *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2013. No. 3 (25). P. 139–144 (in Russian).
8. Makarenko T.V., Nikitin A.N., Erofeenko M.A. Study of the content of copper, cobalt and lead in the bottom sediments of ponds in Gomel city // *Epoha nauki*. 2020. No. 21. P. 300–304 (in Russian). doi: 10.24411/2409-3203-2019-11061
9. Gribovsky Yu.G., Nohrin D.Yu., Davydova N.A., Torchitsky A.N. Content of heavy metals in fish from mineralized Ural water bodies // *Rossijskij zhurnal Problemy veterinarnoj sanitarii, gigieny i ekologii*. 2019. No. 4 (32). P. 461–467 (in Russian). doi: 10.25725/vet.san.hyg.ecol.201904019
10. Makarenko T.V. Heavy metals accumulation in mollusks' of Gomel reservoirs and its adjacent territories // *Ekologicheskij vestnik*. 2013. No. 2. P. 116–121 (in Russian).
11. Tunakova Yu.A., Mukhametshina E.S., Shmakova Yu.A. Investigation of the effectiveness of chitin-based biopolymer sorbents against metals // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2011. No. 14. P. 141–149. (in Russian).
12. Lovkis Z.V., Pavlova O.V., Belova E.A., Trusova M.M. Use of chitosan for natural and waste water treatment // *Food Industry: Science and Technologies*. 2023. V. 16. No. 1 (59). P. 53–61 (in Russian). doi: 10.47612/2073-4794-2023-16-1(59)-53-61
13. Reut K.V., Bereza I.G., Vasilevsky P.B., Derkach S.R. Method of purification of sewage at production of chitine from carapaces of crustacea // Patent No. 2263079 C1. Application: 2004107962/15, 18.03.2004. Date of publication 27.10.2005 (in Russian).
14. Kasyanov G.I., Kubenko E.G. Production technology development of chitosan from shell of Gammarus crustacean's Azov sea // *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2013. No. 1 (331). P. 69–72 (in Russian).
15. Soldatova S.Yu. Technology of producing chitosan from shell-containing materials // *Bulletin of Nizhnevar-tovsk State University*. 2015. No. 1. P. 48–56 (in Russian).
16. de Paula S.M., Silveira M. Studies on molluscan shells: contributions from microscopic and analytical methods // *Micron*. 2009. V. 40. No. 7. P. 669–690. doi: 10.1016/j.micron.2009.05.006
17. Adsorption from solutions on solid surfaces / Eds. G. Parfit, K. Rochester. Moskva: Mir, 1986. 488 p. (in Russian).
18. Khalil A.S., Serpokyrov N.S., Smolyanichenko A.S., Starovoytov S.V. Mathematical description of sorption on modified rice straw // *Engineering Bulletin of Don*. 2018. No. 1 [Internet resource] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4650> (Accessed: 03.10.2025).
19. Shumilova M.A. Application of adsorption models in the study of nickel ion absorption by soil // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 45–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-045-053

Влияние погодных условий вегетационного периода на фотосинтез и эвапотранспирацию в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаёжной подзоны

© 2026. С. В. Загирова, д. б. н., в. н. с.,
М. Н. Мигловец, к. б. н., н. с.,

Р. Г. Гуляев, ст. лаборант-исследователь,

Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ГСП-2, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: zagirova@ib.komisc.ru

Измерения экосистемных потоков CO_2 и H_2O в период вегетации выполнены методом турбулентных пульсаций в сосняке бруснично-лишайниковом на территории Печоро-Ильчского заповедника в 2021–2023 гг. Температурно-влажностный режим определял межгодовые различия gross экосистемного фотосинтеза (*GEP*) и эвапотранспирации (*ET*). Суммарный *ET* в мае–августе разных лет наблюдений составил 139–240 кг $\text{H}_2\text{O}/\text{m}^2$, а суммарный *GEP* – 1,7–2,4 кг CO_2/m^2 . Экосистемные потоки CO_2 и H_2O снижались с увеличением дефицита упругости водяного пара в атмосферном воздухе (*VPD*) при недоборе осадков в летние месяцы. Повышенный запас влаги в почве в первой половине вегетационного периода компенсировал отрицательный эффект дефицита атмосферных осадков в летний период на фотосинтез и эвапотранспирацию. Установлена нелинейная зависимость среднесуточных значений *GEP* и *ET*. Эффективность использования влаги на фотосинтез (*WUE*) в сосняке бруснично-лишайниковом в разные годы изменялась в пределах 7–16 мг $\text{CO}_2/\text{g H}_2\text{O}$. Сбалансированность потоков CO_2 и H_2O определяла незначительное варьирование *WUE* в течение сезона. Результаты многолетних наблюдений могут быть востребованы для верификации существующих климатических моделей и прогнозирования изменений углеродного обмена в таёжных лесах при аномальных погодных явлениях в регионе.

Ключевые слова: сосняк бруснично-лишайниковый, gross экосистемный фотосинтез, эвапотранспирация, эффективность использования воды на фотосинтез.

Weather during the growing season affect photosynthesis and evapotranspiration in the cowberry-lichen pine forest of the middle taiga subzone

© 2026. S. V. Zagirova ORCID: 0000-0002-3304-4160 M. N. Miglovets ORCID: 0000-0001-6653-1144

R. G. Guluaev ORCID: 0009-0001-3209-6647

Institute 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: zagirova@ib.komisc.ru

Ecosystem CO_2 and H_2O fluxes were measured during the growing season using the turbulent pulsation method in a cowberry-lichen pine forest in the Pechora-Ilych Nature Reserve in 2021–2023. Temperature and humidity determined interannual differences in gross ecosystem photosynthesis (*GEP*) and evapotranspiration (*ET*). Total *ET* in May–August of different observation years ranged from 139–240 kg $\text{H}_2\text{O}/\text{m}^2$, while total *GEP* ranged from 1.7–2.4 kg CO_2/m^2 . Ecosystem CO_2 and H_2O fluxes decreased with increasing vapor pressure deficit (*VPD*) and precipitation shortages in summer. Increased soil moisture in the first half of the growing season offset the negative impact of summer precipitation deficits on photosynthesis and evapotranspiration. A nonlinear relationship was established between average daily *GEP* and *ET* values. Water use efficiency (*WUE*) for photosynthesis in the cowberry-lichen pine forest varied between 7 and 16 mg $\text{CO}_2/\text{g H}_2\text{O}$ across years. Balanced CO_2 and H_2O fluxes determined insignificant variations of *WUE* throughout the season. The results of long-term observations can be used to verify existing climate models and predict changes in carbon cycle in taiga forests during extreme weather events in the region.

Keywords: cowberry-lichen pine forest, gross ecosystem photosynthesis, evapotranspiration, water use efficiency for photosynthesis.

Бореальные леса играют значительную роль в регулировании глобального углеродного цикла и газового состава атмосферы, ежегодный сток атмосферного углерода в них составляет 0,5 Пг С (1 Пг = 10^{15} г) или 22 % глобального стока во всех лесах мира [1]. Увеличение температуры и продолжительности вегетационного периода в конце прошлого столетия имело положительный эффект на бюджет углерода в лесных экосистемах северного полушария, в том числе бореальных лесах России [2, 3]. По мнению некоторых авторов, повышение глобальной нетто-продукции наземных экосистем в последние десятилетия вызвано возросшей концентрацией CO_2 в атмосфере, а в регионах с холодным климатом этот эффект усиливался температурным фактором [4].

Фотосинтез древесных растений, обеспечивающий связывание атмосферного углерода и синтез органического вещества, тесно связан с транспирацией единым устьичным механизмом регуляции газообмена [5]. При дефиците доступной для растений атмосферной и почвенной влаги устьица ограничивают транспирацию, тем самым снижают скорость поступления CO_2 в листья. Количество ассимилированного углерода в процессе фотосинтеза на единицу потерянной при транспирации массы воды называется эффективностью использования воды на фотосинтез (*WUE*), которая отражает стратегию адаптации растения к изменению окружающей среды. Этот же показатель применяется для оценки эффективности использования воды на продукцию органического вещества в наземных экосистемах и основывается на результатах непрерывных измерений потоков CO_2 и H_2O эколого-климатических станций [6–8]. Международная база данных FLUXNET включает результаты мониторинга экосистемных потоков парниковых газов более 1000 станций, в том числе 22 станций, действующих на территории России [9]. На основании анализа этих данных установлено, что линейная корреляция валового фотосинтеза (*GPP*) и эвапотранспирации (*ET*) определяет незначительное межгодовое варьирование *WUE* наземной экосистемы [10, 11]. Однако, эффект аномально жаркой и сухой погоды в летние месяцы на *GPP* и *ET* в лесах северной Европы проявлялся по-разному [12], что могло быть вызвано асинхронным ответом фотосинтеза и эвапотранспирации на изменение температуры и осадков, а также влажностного режима почв [7, 13]. В экосистемах вечнозелёных

хвойных лесов северного полушария значение *WUE* соответствовало 2,66–5,42 мг С/г H_2O [8], в спелых насаждениях этот показатель значительно выше, чем в молодняках [14]. В хвойных лесах Канады за 19-летний период наблюдений увеличение *WUE* соответствовало повышению *GPP* и концентрации CO_2 в атмосфере, при этом эвапотранспирация практически не менялась [15].

Европейский северо-восток России характеризуется умеренно-континентальным климатом, с преобладанием циклонической пасмурной и дождливой погоды, продолжительной зимой и коротким летом. В Республике Коми сосновые леса приурочены к борovým террасам, песчаным, зандровым и озёрным равнинам, сосняки лишайниковые занимают на её территории более 1,1 млн га [16]. Ранее проведённые измерения экосистемных потоков в еловом насаждении среднетаёжной подзоны показали, что при разных погодных условиях вегетационного сезона старовозрастный ельник выполняет функцию стока CO_2 , величина которого тесно связана с экосистемным обменом тепла и влаги [17].

Цель данной работы – оценить сезонную и межгодовую вариабельность экосистемных потоков CO_2 и H_2O в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаёжной подзоны в период вегетации по данным измерений методом турбулентных пульсаций.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в 2021–2023 гг. в сосняке бруснично-лишайниковом на территории Якшинского участкового лесничества Печоро-Илычского заповедника ($61^{\circ}49'00''$ с. ш., $56^{\circ}51'60''$ в. д., Республика Коми). На этом участке заповедника преобладают равнинные ландшафты с господством сосновых лесов и сфагновых болот, среди сосняков доминируют лишайниковые и брусничные типы. Сосняки лишайниковые в равнинных ландшафтах заповедника сформированы на бедных по минералогическому составу подзолах иллювиально-железистых со средней мощностью подстилки и низким содержанием гумуса (0,3–0,4 %) [18]. В исследованном сосняке бруснично-лишайниковом древостой составом 10С, V класса бонитета, полнотой 0,8, запасом древесины 177 м³/га, густота живых деревьев составляет 908 шт./га, их возраст варьирует в пределах 56–370 лет [19].

Система для измерений вертикальных потоков CO_2 (F_{CO_2}) по методу турбулентных

пульсаций (eddy covariance) включала ультразвуковой анемометр (Wind Master, Gill Instruments Ltd, США), инфракрасный газоанализатор открытого типа LI-COR 7500 (LI-COR Ltd, США) и автоматическую метеостанцию CS 3000 (Campbell Scientific Inc., США). Характеристика этого метода подробно рассмотрена в публикации [20]. Дефицит упругости водяного пара в атмосферном воздухе (VPD) и эвапотранспирацию (ET) над пологом леса рассчитывали с использованием первичных данных измерительного комплекса по уравнениям, приведённым в программном пакете EddyPro 7.0.1 (LI-COR Ltd, США). Температуру воздуха (T_a) измеряли на уровне положения анемометра и газоанализатора – 22 м над уровнем земли. Температуру (T_s) и объёмное содержание влаги (SWC) в почве регистрировали на глубине 10 см ниже дневной поверхности земли. Для заполнения пропусков в рядах микроклиматических данных использованы данные логгеров **Hobo microstation H-21** (Onset, США). Гидротермический коэффициент Селянинова (GTK) рассчитан по соотношению суммы осадков (PP) и суммы среднесуточных температур воздуха (T_a) выше 10°C .

В анализе использованы результаты измерений в сосняке бруснично-лишайниковом в период устойчивых положительных среднесуточных температур с 1 мая по 31 августа 2021, 2022 и 2023 гг. Зона охвата экологоклиматической станции (футпринт) оценивалась онлайн-инструментом FFPonline (<https://footprint.kljun.net>). Согласно результатам анализа первичных данных, основная доля воздушных потоков (80 %) сосредоточена в радиусе не более 170 м от измерительного комплекса, площадь футпринта варьировала от 3,8 до 5,6 га.

Первичные данные пульсационных измерений обрабатывали в программе EddyPro 7 (LI-COR Inc., США), полученные средние значения вертикального потока CO_2 (F_{CO_2}) за 30 мин. интервал приравнивали нетто-обмену диоксида углерода (NEE) между лесом и приземной атмосферой. После визуальной оценки качества полученных данных для статистического анализа в 2021 г. выбрано 3380, в 2022 г. – 2905, в 2023 г. – 3118 средних 30-мин значений. Для заполнения пробелов и разделения NEE на экосистемное дыхание (R_{eco}) и gross экосистемный фотосинтез (GEP) использовали онлайн-инструмент REddyProc (Университет Макса Планка, Германия, <https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/>

Services/REddyProcWeb). Эффективность использования воды на фотосинтез (WUE) соответствовала отношению GEP/ET ($\text{mgCO}_2/\text{gH}_2\text{O}$).

Статистический анализ выполнен в среде Statistica 10 (StatSoft inc, США). Выборка состояла из среднесуточных значений GEP , ET и метеорологических параметров за период наблюдений ($n = 110$). Для выявления различий между данными трёх лет наблюдений использовали множественное апостериорное сравнение рангов – H -критерий Краскела–Уоллиса. Параметры анализа считались статистически достоверными при $p < 0,05$.

Результаты

Погодные условия. По имеющимся данным Росгидромета для метеостанции «Якша» с 1995 по 2020 гг. средняя температура воздуха в мае–августе составляла $13,0^\circ\text{C}$, а сумма осадков – 293 мм. В 2021 г. тёплая погода установилась в начале вегетационного сезона, в мае–июне среднемесячная температура воздуха на $2\text{--}5^\circ\text{C}$ превышала среднее многолетнее значение, а июль был прохладнее обычного (табл. 1).

В этот год повышенной температуре соответствовала более высокая сумма солнечной радиации, поступающей к поверхности лесного полога соснового леса (табл. 2). В мае–июне 2022 г. температура воздуха была немного ниже многолетней нормы, тёплая погода установилась лишь в июле. В 2023 г. май был очень тёплым, а июнь необычно прохладным. Во все годы благоприятный температурный режим сохранялся в августе, средняя температура в этом месяце на $2\text{--}4^\circ\text{C}$ превышала многолетнее значение. Сумма отклонений среднемесячных температур в мае–августе в 2021 г. составила $8,6^\circ\text{C}$, в 2022 г. и 2023 г. – $5,0$ и $5,1^\circ\text{C}$ соответственно.

Количество выпавших осадков в мае–августе 2021 г. и 2023 г. меньше на 67 и 95 мм, а в 2022 г. больше на 24 мм по сравнению с многолетней нормой. Гидротермический коэффициент Селянинова в 2022 г. составил 1,55, в 2021 г. – 1,06, в 2023 г. – 0,93, соответственно вегетационный период 2021 г. и 2023 г. характеризовался тёплой и засушливой, а 2022 г. – тёплой и влажной погодой. Это подтверждается сезонной динамикой дефицита упругости водяного пара в атмосферном воздухе над пологом древостоя. В 2021 г. в течение всего периода наблюдений VPD значительно превышал результаты,

Таблица 1 / Table 1

Отклонения среднемесячной температуры воздуха (T_a) и суммы осадков (PP) в мае-августе 2021–2023 гг. от многолетних среднемесячных значений за 1995–2020 гг. (по данным метеостанции «Якша», <https://rp5.ru>) / Deviations of average monthly air temperature (T_a) and precipitation amount (PP) in May–August 2021–2023 from long-term average monthly values for 1995–2020 (according to the Yaksha weather station, <https://rp5.ru>)

| Год / Year | Май / May | | Июнь / June | | Июль / July | | Август / August | |
|------------|-----------|------|-------------|-------|-------------|-------|-----------------|-------|
| | T_a | PP | T_a | PP | T_a | PP | T_a | PP |
| 2021 | 4,7 | 14,2 | 2,2 | -36,6 | -1,1 | -44,8 | 2,8 | 0,2 |
| 2022 | -0,5 | 48,8 | -0,1 | -22,6 | 1,9 | -35,8 | 3,6 | 33,1 |
| 2023 | 3,6 | 22,0 | -1,6 | -41,4 | 0,7 | -23,5 | 2,5 | -51,8 |

Таблица 2 / Table 2

Климатические характеристики в бруснично-лишайниковом сосняке в мае-августе 2021–2023 гг. / Mean climatic characteristics in the cowberry-lichen pine forest in May–August 2021–2023

| Показатель / Indicator | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------------------------|------|------|------|
| Сумма / Sum T_a , °C | 1956 | 1851 | 1865 |
| T_a , °C | 15,0 | 14,1 | 14,2 |
| R_g , МДж/м ² | 2278 | 2157 | 2014 |
| T_s , °C | 12,6 | 11,8 | 11,3 |
| SWC, м ³ /м ³ | 0,05 | 0,05 | 0,10 |

Примечания / Notes: T_a – средняя температура воздуха над пологом древостоя / the average air temperature above the forest canopy; R_g – сумма поступающей к лесному пологу коротковолновой солнечной радиации / the sum short-wave solar radiation incoming to the forest canopy; T_s – средняя температура почвы на глубине 10 см / the average soil temperature at 10 cm depth; SWC – средняя объёмная влажность почвы на глубине 10 см / the average volumetric soil moisture at 10 cm depth.

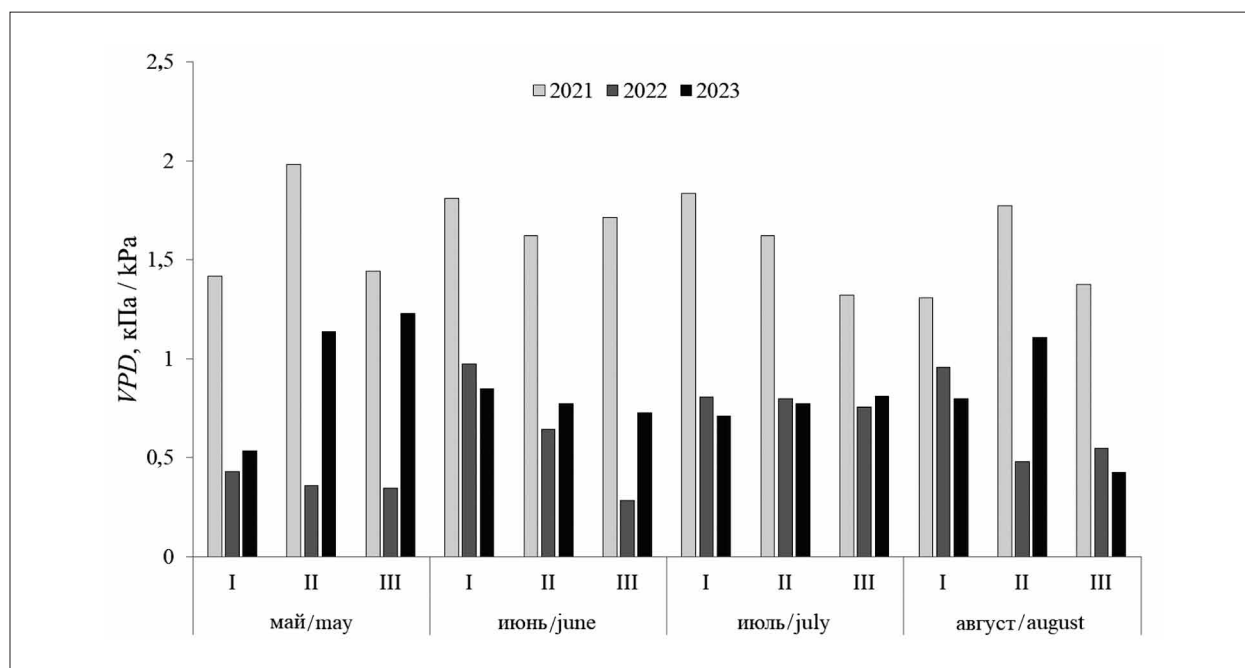


Рис. 1. Сезонный ход среднесуточных значений дефицита упругости водяного пара (VPD) в атмосферном воздухе над пологом соснового леса на высоте 22 м в 2021–2023 гг. I–III – декада месяца / Fig. 1. Seasonal variation of average daily water vapor pressure deficit (VPD) in atmospheric air in pine forest at 22 m height in 2021–2023. I–III – decade of the month

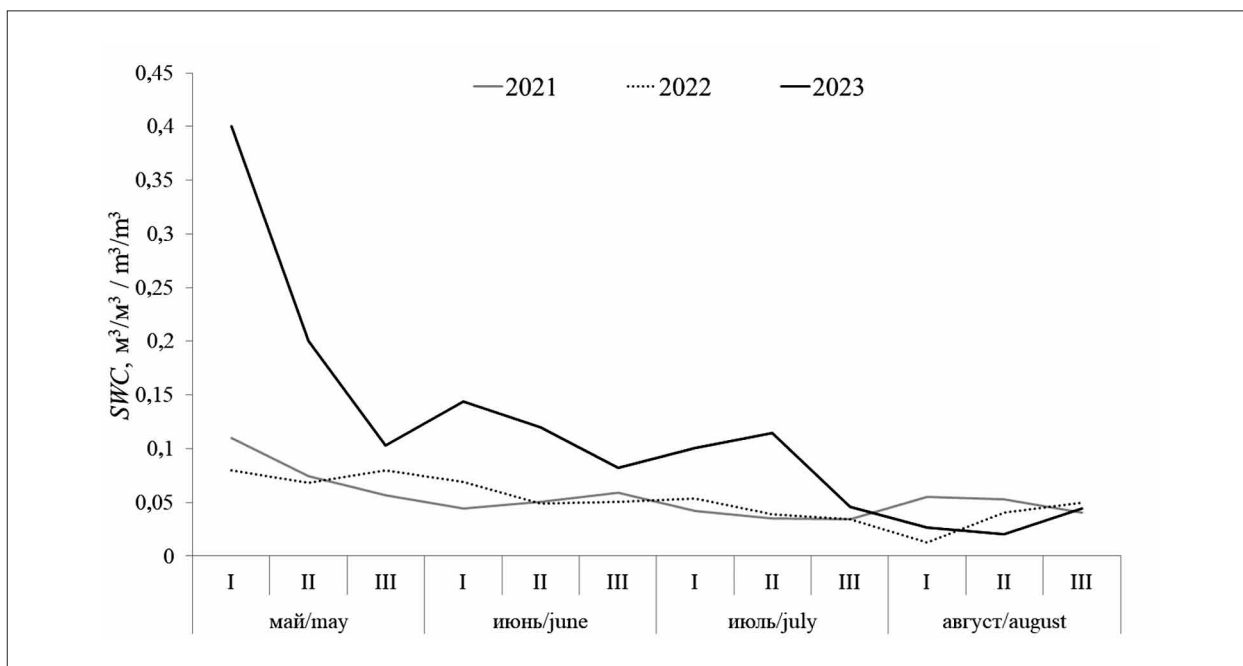


Рис. 2. Сезонный ход объёмного содержания влаги (SWC) в почве соснового леса на глубине 10 см в 2021–2023 гг. I–III – декада месяца

Fig. 2. Seasonal variation of volumetric water content (SWC) in pine forest soil at 10 cm depth in 2021–2023. I–III – decade of the month

Таблица 3 / Table 3

Сумма осадков (PP) и эвапотранспирации (ET) с 1 мая по 31 августа 2021–2023 гг.
The sum of precipitation (PP) and evapotranspiration (ET) from May 1 to August 31, 2021–2023

| Показатель / Indicator | 2021 | 2022 | 2023 |
|--|------|------|------|
| Осадки / Precipitation (PP), мм/mm | 227 | 317 | 199 |
| Эвапотранспирация / Evapotranspiration (ET), мм/mm | 139 | 227 | 238 |
| PP-ET, мм/mm | 88 | 90 | -39 |

полученные в 2022 и 2023 гг. (рис. 1). В 2023 г. недостаток атмосферного увлажнения сохранялся в мае. Среднее значение VPD за сезон в 2021 г. составило 1,6 кПа, в 2022 и 2023 гг. – 0,6 и 0,8 кПа соответственно. В течение сезона объёмное содержание влаги в верхних горизонтах почвы постепенно снижалось и достигало минимальных значений в конце июля или первой декаде августа (рис. 2).

Кратковременное увеличение почвенного увлажнения наблюдали, как правило, после обильных дождей. Минимальное среднее за сезон значение SWC отмечено в 2021 г., а максимальное – в 2023 г. (табл. 2). В первой половине вегетационного периода 2023 г. увлажнение почвы было почти в два раза выше, чем в предыдущие два года. В этот год насыщение почвы влагой могло быть обеспечено обилием зимних осадков. По данным Росгидромета, в районе исследований в январе–марте 2023 г. сумма выпавших осадков составила 157 мм, что в 1,5–2 раза больше, чем в этот же период 2021 и 2022 гг.

Сезонная вариабельность эвапотранспирации, экосистемного обмена CO₂ и WUE. Эвапотранспирация в сосняке бруснично-лишайниковом в период вегетации менялась с изменением температурно-влажностного режима, максимальные суточные потери воды достигали 3 мм H₂O/сут (рис. 3). Среднее значение ET за сезон 2021 г. составило 1,16 ± 0,32 мм H₂O/сут, что достоверно ниже (Н-критерий, p < 0,00001), чем в 2022 г. и 2023 г. (1,9 ± 0,5 и 2,0 ± 0,6 мм H₂O/сут соответственно). В результате сумма ET в мае–августе 2021 г. соответствовала 55–57 % суммы эвапотранспирации в 2022 г. и 2023 г. (табл. 3). В 2023 г. в сосняке бруснично-лишайниковом отмечен отрицательный баланс количества выпавших осадков и суммарного испарения.

Несмотря на отрицательный баланс влаги, в 2023 г. сумма гросс экосистемного фотосинтеза в сосняке бруснично-лишайниковом на 18–26 % превышала значения, полученные в предыдущие два года (табл. 4).

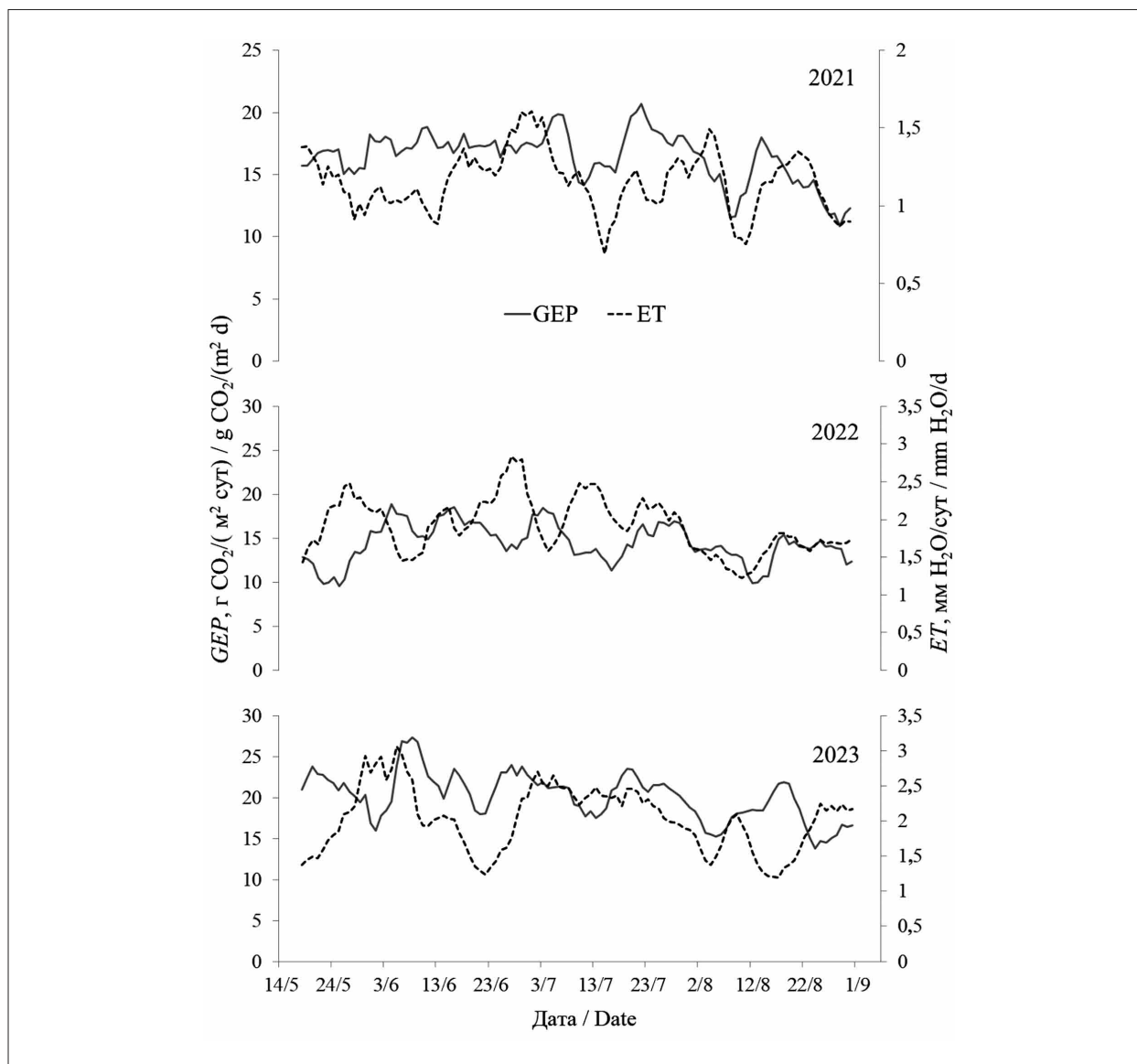


Рис. 3. Сезонный ход среднесуточных значений *GPP* и *ET* в сосняке в мае–августе 2021–2023 гг. Показаны сглаженные кривые с шагом 5 суток
Fig. 3. Seasonal variation of *GPP* and *ET* average daily values in pine forest in May–August 2021–2023. Smoothed curves with a 5-day step are shown

Таблица 4 / Table 4
 Сумма gross экосистемного фотосинтеза (г CO₂/(м² мес) и эвапотранспирации (мм H₂O/(м² мес) в 2021–2023 гг. / The sum of gross ecosystem photosynthesis (g CO₂/(m² month) and evapotranspiration (mm H₂O/(m² month) in 2021–2023

| Месяц / Month | 2021 | 2022 | 2023 |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| Май / May | 418,7/31,4 | 346,7/48,8 | 523,6/52,0 |
| Июнь / June | 524,8/36,9 | 487,7/63,3 | 669,5/61,6 |
| Июль / July | 542,7/36,4 | 467,1/62,8 | 637,6/70,4 |
| Август / August | 437,7/34,5 | 408,4/52,6 | 523,4/54,2 |
| Сумма / Sum | 1923,9/139,1 | 1709,9/227,5 | 2354,1/238,2 |

Примечание / Note: в числителе / in the numerator – *GPP*, в знаменателе / in the denominator – *ET*.

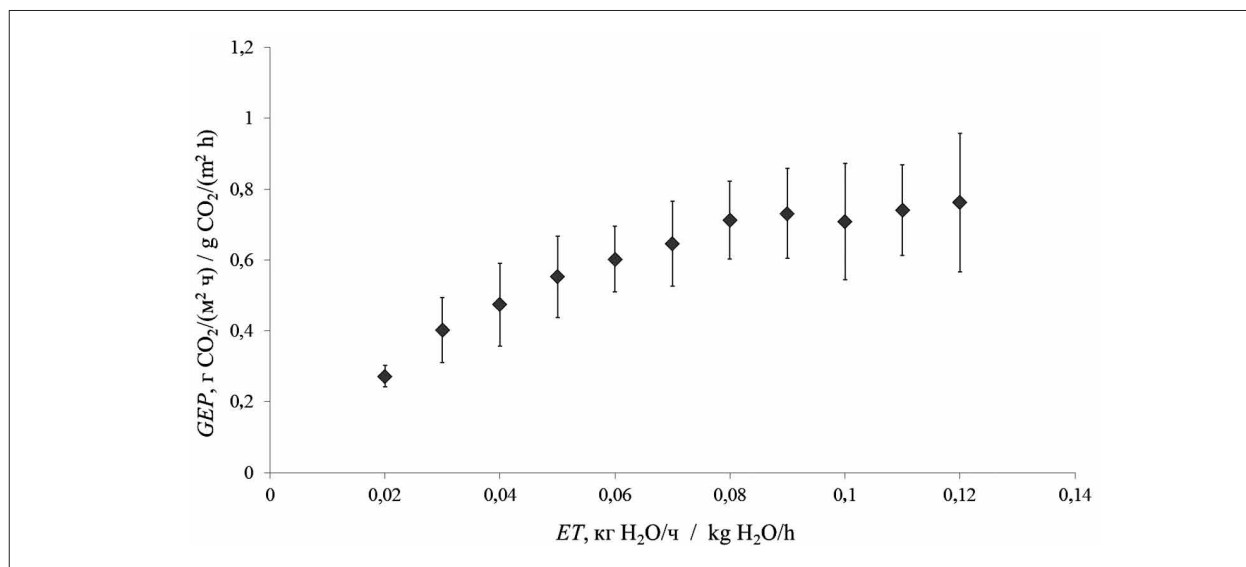


Рис. 4. Зависимость среднесуточных значений *GEP* от *ET* в сосняке в мае–августе 2021–2023 гг. Бары соответствуют стандартным отклонениям средних значений

Fig. 4. Dependence of average daily *GEP* on *ET* in pine forest in May–August 2021–2023. Bars represent standard deviations of the mean values

В 2021 г. и 2022 г. среднее за сезон значение *GEP* соответствовало $16,31 \pm 3,30$ и $14,4 \pm 3,5$ г $\text{CO}_2/(\text{m}^2\text{сут})$, в 2023 г. составило 20 ± 4 г $\text{CO}_2/(\text{m}^2\text{сут})$. Среднесуточные значения *GEP* достоверно различались между годами (Н-критерий, $p < 0,0001$). При этом установлена нелинейная зависимость скорости gross экосистемного фотосинтеза от эвапотранспирации, с увеличением эвапотранспирации от 0,02 до 0,08 кг $\text{H}_2\text{O}/(\text{m}^2\text{ час})$ *GEP* повысился в четыре раза, при более высоких значениях *ET* практически не менялся (рис. 4).

Эффективность использования воды на фотосинтез (*WUE*) также менялась в течение сезона с изменением gross экосистемного фотосинтеза и эвапотранспирации. В мае–августе 2021 г. среднемесячные значения *WUE* соответствовали 12–16, в 2022 г. – 7–8, в 2023 г. – 9–11 мг $\text{CO}_2/\text{г H}_2\text{O}$.

Погодные условия определяли сезонный ход экосистемных потоков CO_2 и H_2O в сосняке бруснично-лишайниковом. В 2021 г. при тёплой и сухой погоде в летние месяцы наблюдали значительное снижение *GEP* и *ET*. В 2023 г. при сходных погодных условиях суммарный *GEP* в сосновом насаждении был на 26 % выше, чем в 2021 г. Повышенный запас почвенной влаги в этот год мог компенсировать отрицательное влияние дефицита осадков на обмен CO_2 и эвапотранспирацию в экосистеме.

В бореальных лесах в годичном цикле суммарное испарение воды не является по-

стоянной величиной и в некоторые годы может значительно превышать сумму выпавших осадков [21]. В исследованном нами сосновом насаждении *ET* в мае–августе 2021–2023 гг. варьировало от 139 до 238 мм. В сосняке бруснично-зеленомошном Финляндии сумма *ET* в разные годы составляла 218–361 мм/год [22]. В экосистеме леса эвапотранспирация представляет сумму двух процессов – транспирации растений и физического испарения воды с подстилающей поверхности. Известно, что в спелых сосновых лесах доля физического испарения с поверхности живого напочвенного покрова в суммарной эвапотранспирации в тёплый период года составляет 16–25 % [22], а доля транспирации растений – около 80 % [14]. В условиях засухи закрытие устьиц обеспечивает растениям экономию влаги, но приводит к снижению поступления CO_2 в фотосинтезирующие клетки листьев [5, 23]. Экстремально низкое почвенное увлажнение усиливает отрицательный эффект дефицита атмосферной влаги на обмен CO_2 хвойных растений. У сосны обыкновенной в Сибири в летние месяцы при снижении содержания влаги в 0–50 см слое почвы до 30 мм и относительной влажности воздуха до 15–20 % фотосинтетическая продуктивность сокращалась на 20 % [24]. Возможно, в период вегетации 2023 г. при дефиците осадков повышенный запас почвенной влаги обеспечил активную транспирацию и фотосинтез растений, что

положительно повлияло на *ET* и *GPP* в исследованном сосновом насаждении.

В 2022 г. с увеличением суммы осадков эвапотранспирация усиливалась, однако gross экосистемный фотосинтез оказался ниже, чем в 2021 и 2023 гг. Снижение gross экосистемного фотосинтеза в сосняке при избыточном атмосферном увлажнении могло быть сопряжено со снижением транспирации древесных растений, что согласуется с результатами эколого-физиологических исследований хвойных растений в Карелии [25]. Авторы этой работы доказали, что зависимости «показатель водного обмена – фактор среды» у сосны обыкновенной не являются линейными, максимальная реализация водного потока, обеспечивающего транспирацию, происходит при относительной влажности воздуха 45–70 % и температуре воздуха 13–20 °С, а за пределами этих диапазонов водный поток через ксилему дерева снижается. Поэтому повышенная эвапотранспирация в 2022 г. могла быть обусловлена не усилением транспирации растений, а увеличением физического испарения с лесопокрытой поверхности воды, поступившей в избытке с осадками.

В связи с продолжающимся потеплением глобального климата исследованиям влияния температурно-влажностного режима на экосистемный обмен CO_2 в лесных экосистемах уделяют много внимания, однако результаты этих исследований не всегда однозначны. Некоторые авторы максимальную продуктивность фотосинтеза хвойных сообществ в Европе наблюдали в периоды вегетации с жаркой и сухой погодой [26, 27]. В то время как в хвойных лесах Северной Америки [28] и России [29] установлено отрицательное влияние аномально высоких летних температур на сток CO_2 . Результаты климатического моделирования показали, что 90 % межгодовой вариабельности глобального стока CO_2 в наземных экосистемах определяется содержанием влаги в почве, при этом прямой эффект этого фактора на фотосинтез составляет 20 %, а косвенный эффект через обратную связь влажности почвы с температурой и *VPD* ответствен за большую часть (60 %) изменчивости биологической продуктивности [30]. Как отмечают авторы этой статьи, при засухе низкое содержание влаги в почве ограничивает эвапотранспирацию, которая является наиболее эффективным механизмом охлаждения поверхности земли, что в конечном итоге приводит к увеличению температуры и снижению относительной влажности воздуха. Этим мож-

но объяснить повышение *VPD* при сохранении низкой эвапотранспирации в исследованном сосняке бруснично-лишайниковом в мае–августе 2021 г. Увеличение *VPD* со снижением эвапотранспирации в сосняке в летний период наблюдали также в Финляндии, при этом эффект влажности почвы на среднесуточные значения *GPP* проявился сильнее, чем на *ET* [13].

Сезонная и межгодовая вариабельность *WUE* отражает влияние водного режима на углеродный бюджет в экосистеме. За три года наблюдений в спелом сосняке бруснично-лишайниковом на территории Печоро-Илычского заповедника при разных погодных условиях отношение суммарных за сезон значений *GEP/ET* варьировало в пределах 7–16 мг $\text{CO}_2/\text{г H}_2\text{O}$ (или 2,2–4,3 мг С/г H_2O). При недоборе осадков в мае–августе 2021 г. повышение *WUE* обусловлено, прежде всего, низкой скоростью эвапотранспирации, в результате в этот год суммарный *ET* был почти в два раза меньше. В старовозрастном ельнике Канады в течение 19-летних наблюдений среднегодовые значения *WUE* повышались с увеличением *GEP*, при этом эвапотранспирация практически не менялась [15]. В лесах Европы *WUE* варьировал в пределах 1–6 г С/кг H_2O , при этом межгодовые различия этого показателя в одном и том же насаждении не превышали 1 г С/кг H_2O [10]. В сосновых лесах Северной Америки *WUE* соответствовал 2,4–4,0 г С/кг H_2O и повышался с увеличением возраста древостоя [14]. В сосняке лишайниковом Сибири значение *WUE* незначительно различалось между годами с разным режимом увлажнения и составило в среднем 11 мг $\text{CO}_2/\text{г H}_2\text{O}$ [30]. В смешанном насаждении сосны корейской в горах Восточного Китая *WUE* в период вегетации соответствовало 10,47 мг $\text{CO}_2/\text{г H}_2\text{O}$ [7]. В хвойных лесах Канады его значение составило 3,0–3,7 мг С/г H_2O [11, 31], а эффективность использования воды на продукцию стволов – 3,15 кг/дм³ H_2O [32]. По мнению авторов, незначительные межгодовые различия *WUE* в экосистеме обусловлены сопряженностью *GPP* и *ET* [10, 11]. Нелинейная зависимость среднесуточных значений *GEP* от *ET* в исследованном сосняке бруснично-лишайниковом может быть обусловлена разной чувствительностью экосистемного обмена CO_2 и H_2O к изменениям факторов окружающей среды [8].

Заключение

На основании данных измерений методом турбулентных пульсаций установлены меж-

годовые различия экосистемных потоков CO_2 и H_2O в сосняке бруснично-лишайниковом среднетаёжной подзоны. Температурно-влажностный режим определял сезонный ход *GEP* и *ET*. При недоборе осадков в период вегетации увеличение *VPD* приводило к снижению обмена H_2O и CO_2 между лесом и приземной атмосферой. Повышенный запас почвенной влаги в летние месяцы смягчал отрицательный эффект атмосферной засухи на *GEP* и *ET* в сосновом насаждении. При умеренно тёплой погоде повышенное количество осадков положительно влияло на эвапотранспирацию, при этом gross экосистемный фотосинтез снижался. В мае–августе суммарный *ET* составил 139–240 кг $\text{H}_2\text{O}/\text{м}^2$, а *GEP* – 1,7–2,4 кг $\text{CO}_2/\text{м}^2$. Значение *WUE* в разные годы составило 7–16 мг $\text{CO}_2/\text{г H}_2\text{O}$, что согласуется с результатами исследований потоков парниковых газов в других типах хвойных лесов. Сбалансированность экосистемных потоков CO_2 и H_2O обеспечивает устойчивое функционирование сосняка бруснично-лишайникового при разных погодных условиях в период вегетации. В европейской части России в текущем столетии ожидается сохранение тенденции увеличения числа аномально тёплых дней и опасных метеорологических явлений. В связи с этим данные многолетних исследований экосистемного обмена CO_2 и H_2O могут быть востребованы в прогнозировании изменений экосистемных функций таёжных лесов в регионе.

References

- Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais Ph., Jackson R.B., Pacala S.W., McGuire A.D., Piao Sh., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science*. 2011. V. 333. P. 998–993. doi: 10.1126/science.1201609
- Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D., Nillson S., Ayyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // *Glob. Chang. Biol.* 2005. V. 11. P. 2090–2102. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.001069.x
- Piao S., Friedlingstein P., Ciais P., Viovy N., Demarty J. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades // *Glob. Biogeochem. Cycles*. 2007. V. 21. No. 3. Article No. GB3018. doi: 10.1029/2006GB002888
- Fernández-Martínez M., Sardans J., Chevallier J., Ciais P., Obersteiner M., Vicca S., Canadell J.G., Bastos A., Friedlingstein P., Sitch S., Piao S.L., Janssens I.A., Peñuelas J. Global trends in carbon sinks and their relationships with CO_2 and temperature // *Nature Climate Change*. 2019. V. 9. P. 73–79. doi: 10.1038/s41558-018-0367-7
- Vygodskaya N.N., Milyukova I., Varlagin A., Tatarinov F., Sogachev A., Kobak K.I., Desyatkin R., Bauer G., Hollinger D.Y., Kelliher F.M., Schulze E.D. Leaf conductance and CO_2 assimilation of *Larix gmelinii* growing in an eastern Siberian boreal forest // *Tree Physiol.* 1997. V. 17. P. 607–615. doi: 10.1093/treephys/17.10.607
- Law B.E., Falge E., Gu L., Baldocchi D., Bakwin P., Berbigier P., Davis K.J., Dolman J., Falk M., Fuentes J.D., Goldstein A.H., Granier A., Grelle A., Hollinger D., Janssens I.A., Jarvis P., Jensen N.O., Katul G., Malhi Y., Matteucci G., Meyers T., Monson R.K., Munger W., Oechel W., Olson R., Pilegaard K., Paw U K.T., Thorgeirsson H., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K., Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2002. V. 113. P. 97–120. doi: 10.1016/S0168-1923(02)00104-1
- Yu G., Song X., Wang Q., Liu Y., Guan D., Yan J., Sun X., Zhang L., Wen X. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables // *New Phytol.* 2007. V. 177. No. 4. P. 927–937. doi: 10.1111/j.1469-8137.2007.02316.x
- Beer C., Ciais P., Reichstein M., Baldocchi D., Law B.E., Papale D., Soussana J.-F., Ammann C., Buchmann N., Frank D., Gianelle D., Janssens I.A., Knohl A., Kstner B., Moors E., Rouspard O., Verbeeck H., Vesala T., Williams C.A., Wohlfahrt G. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level // *Global Biogeochem. Cycles*. 2009. V. 23. Article No. GB2018. doi: 10.1029/2008GB003233
- Kuricheva O.A., Avilov V.K., Varlagin A.V., Gatarsky M.L., Dmitrichenko A.A., Dyukarev E.A., Zagirova S.V., Zamolodchikov D.G., Zyryanov V.I., Karelin D.V., Karsanaev S.V., Kurganova I.N., Lapshina E.D., Maksimov A.P., Maksimov T.Kh., Mamkin V.V., Marunich A.S., Miglovets M.N., Mikhailov O.A., Panov A.V., Petrov R.E., Prokushkin A.S., Sidenko N.V., Shilkin A.V., Kurbatova Yu.A. Reflux: the network of the eddy covariance sites in Russia // *Izvestia RAS. Seriya Geograficheskaya*. 2023. V. 87. No. 4. P. 512–535 (in Russian). doi: 10.31857/S2587556623040052
- Reichstein M., Ciais P., Papale D., Valentini R., Running S., Viovy N., Cramer W., Granier A., Ogee J., Allard V., Aubinet M., Bernhofer Chr., Buchmann N., Carrara A., Grunwald T., Heimann M., Heinesch B., Knohl A., Kutsch W., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Pilegaard K., Pumpanen J., Rambal S., Chaphoff S., Seufert G., Soussana J.-F., Sanz M.-J., Vesala T., Zhao M. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. P. 634–651. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01224.x
- Brümmer Ch., Black T.A., Jassal R.S., Grant N.J., Spittlehouse D.L., Chen B., Nesic Z., Amiro B.D., Arain M.A., Barr A.G., Bourque Ch., Coursolle C., Dunn A., Fla-

- nagan L.B., Humphreys E.R., Lafleur P.M., Margolis H.A., McCoughey J.H., Wofsy S.C. How climate and vegetation type influence evapotranspiration and water use efficiency in Canadian forest, peatland and grassland ecosystems // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2012. V. 153. P. 14–30. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.04.008
12. Lindroth A., Holst J., Linderson M.L., Aurela M., Biermann T., Heliasz M., Chi J., Ibrom A., Kolari P., Klemmedtsson L., Krasnova A., Laurila T., Lehner I., Lohila A., Mammarella I., Mölder, M., Löfvenius M.O., Peichl M., Pilegaard K., Soosar K., Vesala T., Vestin P., Weslien P., Nilsson M. Effects of drought and meteorological forcing on carbon and water fluxes in Nordic forests during the dry summer of 2018 // *Phil. Trans. R. Soc.* 2020. V. 375. Article No. 20190516. doi: 10.1098/rstb.2019.0516
13. Gao Y., Markkanen T., Aurela M., Mammarella I., Thum T., Tsuruta A., Yang H., Aalto T. Response of water use efficiency to summer drought in a boreal Scots pine forest in Finland // *Biogeosciences*. 2017. V. 14. P. 4409–4422. doi: 10.5194/bg-14-4409-2017
14. Irvine J., Law B.E., Kurpius M.R., Anthoni P.M., Moore D., Schwarz P.A. Age-related changes in ecosystem structure and function and effects on water and carbon exchange in ponderosa pine // *Tree Physiol.* 2004. V. 24. No. 7. P. 753–763. doi: 10.1093/treephys/24.7.753
15. Liu P., Black T.A., Jassal R.S., Zha T., Nestic Z., Barr A.G., Helgason W.D., Jia X., Tian Y., Stephens J.J., Ma J. Divergent long-term trends and interannual variation in ecosystem resource use efficiencies of a southern boreal old black spruce forest 1999–2017 // *Glob. Chang Biol.* 2019. V. 25. P. 3056–3069. doi: 10.1111/gcb.14674
16. *Forests of the Komi Republic* / Eds. G.M. Kozubov, A.I. Taskaev. Moskva: DIK, 1999. 331 p. (in Russian).
17. Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Schneider Ju. Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal spruce and peatland ecosystems // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 12–20. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-012-020
18. *Soils and soil cover of the Pechora-Ilych Nature Reserve (Northern Urals)* / Eds. S.V. Degteva, E.M. Lapteva. Syktyvkar, 2013. 327 p. (in Russian).
19. *Carbon in Forest and Wetland Ecosystems of Specially Protected Natural Areas of the Komi Republic* / Eds. K.S. Bobkova, S.V. Zagirova. Syktyvkar, 2014. 201 p. (in Russian).
20. Baldocchi D.D., Hincks B.B., Meyers T.P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods // *Ecology*. 1988. V. 69. No. 5. P. 1331–1340. doi: 10.2307/1941631
21. Barr A.G., Black T.A., Hogg E.H., Griffiths T.J., Morgenstern K., Kljun N., Theede A., Nestic Z. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forests, 1994–2003 // *Global Change Biology*. 2007. V. 13. No. 3. P. 561–576. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01220.x
22. Launianen S. Seasonal and inter-annual variability of energy exchange above a boreal Scots pine forest // *Biogeosciences*. 2010. V. 7. P. 3921–3940. doi: 10.5194/bgd-7-6441-2010
23. Qaderi M.M., Martel A.B., Dixon S.L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation // *Plants (Basel)*. 2019. V. 8. No. 3. Article No. 65. doi: 10.3390/plants8030065
24. Suvorova G.G. *Photosynthesis of Coniferous Trees in Siberia* / Ed. R.K. Salyaev. Novosibirsk: GEO, 2009. 195 p. (in Russian).
25. Sazonova T.A., Kolosova S.V. The effect of environmental factors on the parameters of water metabolism of *Pinus sylvestris*, *Picea abies* (Pinaceae), and *Betula pendula* (Betulaceae) // *Botanical Journal*. 2005. V. 90. No. 8. P. 1227–1235 (in Russian).
26. Ziemblińska K., Urbaniak M., Chojnicki B.H., Black T.A., Niu S., Olejnik J. Net ecosystem productivity and its environmental controls in a mature *Scots pine* stand in north-western Poland // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2016. V. 228–229. P. 60–72. doi: 10.1016/j.agrformet.2016.05.022
27. Mamkin V., Varlagin A., Yaseneva I., Kurbatova J. Response of spruce forest ecosystem CO₂ fluxes to inter-annual climate anomalies in the southern taiga // *Forests*. 2022. V. 13. No. 7. Article No. 1019. doi: 10.3390/f13071019
28. Xu B., Arain M.A., Black T.A., Law B.E., Pastorello G.Z., Chu H. Seasonal variability of forest sensitivity to heat and drought stress: A synthesis based on carbon fluxes from North American forest ecosystems // *Global Change Biology*. 2020. V. 26. No. 2. P. 901–918. doi: 10.1111/gcb.14843
29. Zamolodchikov D.G., Gitarsky M.L., Shilkin A.V., Marunich A.S., Karelin D.V., Blinov V.G., Ivashchenko A.I. Monitoring of carbon dioxide and water vapor cycles at the “Log Tayozhny” experimental site (national park “Valdaysky”) // *Fundamental and Applied Climatology*. 2017. V. 1. P. 54–68 (in Russian). doi: 10.21513/2410-8758-2017-1-54-68
30. Tchebakova N.M., Zyryanov V.I., Zyryanova O.A., Parfenova E.I., Kajimoto T., Matsuura Y. A comparative study of climatology, energy and mass exchange in two forests on contrasting habitats in central Siberia: permafrost *Larix gmelinii* vs. permafrost-free *Pinus sylvestris* // *Forests*. 2023. V. 14. No. 2. Article No. 346. doi: 10.3390/f14020346
31. Kljun N., Black T.A., Griffis T.J., Barr A.G., Gaumont-Guay D., Morgenstern K., McCaughey J.H., Nestic Z. Response of net ecosystem productivity of three boreal forest stands to drought // *Ecosystems*. 2006. V. 9. P. 1128–1144. doi: 10.1007/s10021-005-0082-x
32. Urban J., Rubtsov A.V., Shashkin A.V., Benkova V.E. Growth, transpiration and water use efficiency of *Larix sibirica*, *Larix gmelinii* and *Pinus sylvestris* forest in Siberia // *Acta Hort.* 2018. V. 1222. P. 125–131. doi: 10.17660/ActaHortic.2018.1222.17

УДК 504.062

Классификация отходов как основа управления потоками отходов. Нормативно-правовой аспект

© 2026. Т. А. Мусихина, к. г. н., доцент,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: mta_mta@mail.ru

В основу системы управления отходами производства и потребления в Российской Федерации во многом положена их классификация по уровням опасности, законодательно закреплённая в Федеральном законе «Об отходах производства и потребления» и детализированная в соответствующих подзаконных актах, региональном законодательстве и муниципальных нормативных актах. Проведённый анализ нормативно-правового обеспечения, правоприменительной и судебной практик в сфере обращения с отходами производства и потребления показал, что в контексте управления потоками отходов необходимо также дополнительно учитывать и некоторые другие подходы, такие как классификация по видам отходов (производства или потребления), источникам их образования (промышленный сектор экономики, население, объекты социальной инфраструктуры и т. д.), а также учитывать категории и местоположение отходообразователей. Соответствующие нормы относительно классификаций отходов содержатся, в том числе, в федеральных законах и нормативно-правовых актах, регулирующих некоторые другие сферы деятельности (например, энергетика, медицина и жилищно-коммунальное хозяйство), что обуславливает необходимость комплексного междисциплинарного подхода к управлению потоками отходов, а также доработки нормативно-методической документации для поддержки управленческих решений в сфере создания экономики замкнутого цикла.

Ключевые слова: классы опасности отходов, виды отходов, обращение с отходами, экологическая политика, утилизация отходов, управление потоками отходов, нормативная база обращения отходов.

Waste classification as the basis for waste flow management. Regulatory and legal aspects

© 2026. Т. А. Musikhina ORCID: 0000-0003-4714-0572
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: mta_mta@mail.ru

The waste management system in the Russian Federation is largely based on the classification of waste by hazard level, which is legally established in the Federal Law on Waste of Production and Consumption and is detailed in relevant bylaws, regional legislation, and municipal regulations. At the same time, the analysis of legal and regulatory frameworks, law enforcement practices, and judicial practices in the field of waste management has shown that in the context of waste management, it is also necessary to take into account some other approaches, such as classification by type of waste (production or consumption), sources of waste generation (industrial sector, population, social infrastructure facilities, etc.), and categories and locations of waste generators. It was also found that relevant regulations regarding waste classifications based on other factors are contained in federal laws and regulations governing certain other areas of activity (e. g., energy, medicine, and housing and utilities), which necessitates a comprehensive interdisciplinary approach to waste management and the development of regulatory and methodological documentation to support management decisions in the field of creating a circular economy.

Keywords: hazard classes of waste, types of waste, waste management, environmental policy, waste disposal, waste flow management, regulatory framework for waste management.

Для решения проблем с нарастающим количеством отходов и их негативным влиянием на окружающую среду (ОС) на государственном уровне разработаны и законодательно за-

креплены основные направления, принципы и запреты, предусмотренные в Федеральных законах (ФЗ) от 10.02.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и от 24.06.1998

№ 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления». Одним из эффективных направлений деятельности в этой сфере определено вовлечение отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья и создание экономики замкнутого цикла, для чего принята соответствующая федеральная программа. Объектом программы является система обращения с отходами как комплексная социально-экономическая структура, а предметом – механизмы, отношения и процессы, предназначенные для достижения целей замкнутого цикла, таких, например, как обеспечение к 2030 г. сортировки 100 % объёма ежегодно образуемых твёрдых коммунальных отходов (ТКО), захоронение не более чем 50 % таких отходов и вовлечение в хозяйственный оборот не менее чем 25 % отходов производства и потребления в качестве вторичных ресурсов и сырья. Для достижения этих целей и вовлечения отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья требуется комплексный подход и совершенствование нормативно-правового обеспечения системы управления потоками различных отходов, поскольку отходы весьма разнообразны как по уровню негативного воздействия на ОС, так и по видам и источникам их образования [1].

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор, направленный на структурирование правовых вопросов управления потоками отходов и критический анализ нормативно-правовой базы в сфере управления системой обращения отходов производства и потребления Российской Федерации (РФ), представленной в современных поисково-информационных системах Техэксперт и Консультант плюс, поисковых системах агентства правовой информации АПИ, ГАС Правосудие, Судебные решения РФ по состоянию на 21.01.2026, а также публикаций по правовым вопросам правоприменительной практики в системе управления отходами производства и потребления за период 2023 по 2025 гг. в сервисе eLIBRARY. Подбор проводился по запросам: нормативно-правовое обеспечение обращения с отходами, управление отходами, классификация отходов, проблемы обращения отходов, правоприменительная и судебная практика в сфере обращения отходов. Всего проанализировано 207 источников. Материал анализировался с учётом соблюдения иерархии по

юридической силе и соответствия действующим по состоянию на 01.01.2026 редакциям законодательных и нормативно-правовых актов (НПА).

Результаты и обсуждение

Государственное регулирование потоками отходов занимает ведущую роль в сфере обращения с отходами производства и потребления и осуществляется правовыми, административными, экономическими и информационными методами в соответствии с законодательно закреплённым разделением полномочий в этой сфере.

В основу государственного управления отходами в настоящее время во многом положена их экологическая классификация по признаку опасности, то есть деление отходов на I–V классы опасности в зависимости от степени негативного воздействия на ОС и распределение отходов по видам в соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов (ФККО). С этой целью в РФ в развитие ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998 разработаны нормативно-правовые и нормативно-методические документы в области паспортизации и классификации отходов. В первую очередь к ним относится ГОСТ Р 53691-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Паспорт отхода I–IV класса опасности. Основные требования», приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 31.03.2025 № 158 «Об утверждении критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» и «Федеральный классификационный каталог отходов», утверждённый приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242.

Оформление паспорта обязательно для каждого отхода, относящегося к I–IV классам опасности, который представляет собой документ, удостоверяющий принадлежность к отходам соответствующего вида и класса опасности и содержащий сведения об их составе (происхождение, химический и компонентный состав, агрегатное состояние, класс опасности по уровню негативного воздействия на ОС и т. д.). Порядок заполнения паспортов утверждён приказом Росприроднадзора от 08.12.2020 № 1026 «Об утверждении порядка паспортизации и типовых форм паспортов отходов I–IV классов опасности». Для отходов V класса, практически неопасных отходов, паспорта не предусмотрены, при этом их принадлежность к V классу подтверждается

биотестированием – методом оценки опасности и токсичности с использованием тест-организмов.

Разработка паспортов отходов, где ключевую роль играют определение и утверждение класса опасности отхода, решает задачи регламентации и контроля при обращении с отходами.

Для функционирования системы обращения с отходами также во многом учитываются положения ФККО, где перечислены виды отходов и присвоенные им коды. Код каждого вида отходов имеет 11-тизначную структуру: первые восемь знаков кода используются для кодирования происхождения вида отходов и их состава, девятый и десятый знаки – для кодирования агрегатного состояния и физической формы вида отходов, одиннадцатый – для кодирования класса опасности отхода в зависимости от степени негативного воздействия на ОС. Федеральный классификационный каталог отходов используется, в том числе, при паспортизации отходов, поскольку в нём необходимо указать их вид в соответствии с данным нормативно-методическим документом. Указанный каталог также содержит информацию о различных характеристиках отходов, которые могут быть важны при оформлении паспортов.

Кроме того, следует отметить, что обращение с отходами I–IV классов опасности требует лицензирования этого вида деятельности.

Поскольку рациональное управление обращения с отходами согласно Конституции РФ находится в совместном ведении РФ и её субъектов, ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998 установлены полномочия по уровням государственной власти, а также местного самоуправления. На основе анализа законодательно закреплённых норм по разделению полномочий в сфере обращения с отходами и правоприменительной практики проанализирована классификация отходов по степени их экологической опасности (табл. 1).

Из таблицы 1 можно видеть, что отходы в управленческом контексте можно поделить на 3 группы, сформированные относительно их классов опасности и субъектов управления. При этом по каждой группе в таблице 1 выделены проблемные вопросы управления по видам отходов (производства или потребления), требующие дополнительных мер регулирования.

1-я группа – отходы потребления I и II классов опасности (соответственно – чрезвычайно- и высокоопасные). Управление такого

рода отходами осуществляется структурами, контролируемые государственными органами федерального уровня. При этом при обращении с отходами производства и потребления на промышленных предприятиях правовых вопросов к системе обращения в контексте управления практически нет, поскольку запущена в работу цифровая платформа (ФГИС ОПВК), которая является единым окном, которое позволяет эффективно организовать взаимодействие в режиме реального времени. Она даёт возможность централизованно заключать договорные соглашения с ФГУП «ФЭО» (таким образом производитель отходов напрямую сотрудничает с федеральным оператором, минуя посредников) и проводить эффективный контроль передвижения отходов от места их образования до пункта утилизации, переработки или обеззараживания. Однако для отходов потребления I и II классов опасности, образующихся от населения, объектов социнфраструктуры и индивидуальных предпринимателей (ИП), соответствующая система и механизмы обращения до сих пор до конца не отрегулированы.

2 группа – отходы производства и потребления III и IV классов опасности (соответственно – умеренно- и малоопасные). Относительно системы управления по этой группе отходов производства можно отметить, что образующие такого рода отходы субъекты экономики самостоятельно решают задачи в сфере их обращения, при этом рынок работ и услуг в этой сфере во многом ещё не сложился. В этой связи особого внимания требуют вопросы системного информационного обеспечения относительно технологий утилизации, реестров отходообразователей и переработчиков, а также транспортировщиков отходов. Такая информация будет полезна всем участникам (экономическим контрагентам) рынка отходов, поскольку экологическая политика РФ направлена на значительное сокращение объёмов отходов в ближайшее десятилетие и переход на экономику замкнутого цикла. Сбор и генерирование данных о количестве и некоторых характеристиках образующихся отходов, а также реестры отходообразователей и переработчиков отходов находятся в ведении региональных органов власти. Сведения об отходах относительно возможности (необходимости) их дальнейшего использования при производстве продукции содержатся (и регулярно пополняются) в нормативно-правовых документах в сфере охраны ОС. Таким образом, для эффективной

Таблица 1 / Table 1

Группировка отходов относительно их классификации по степени экологической опасности
Grouping of waste according to its classification by environmental hazard

| Группа Group | Класс опасности Hazard class | Субъекты управления Subjects of management | Примечание Note | Виды отходов, требующие дополнительных мер в сфере управления Types of waste that require additional management measures |
|-----------------|---------------------------------------|---|--|--|
| 1 | I–II | ФГУП «Федеральный экологический оператор» (ФГУП «ФЭО») | ФЭО определяется Правительством РФ по предложению Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», согласованному с уполномоченным Правительством РФ федеральным органом исполнительной власти | Отходы потребления от населения, объектов социальной инфраструктуры, объектов IV-й категории* по уровню НВОС и индивидуальных предпринимателей (ИП) |
| 2 | III–IV | Субъекты экономики (отходообразователи, транспортные компании и предприятия по переработке отходов) | Субъекты экономики (отходообразователи, транспортники и переработчики отходов) самостоятельно занимаются вопросами обращения и утилизации промышленных отходов | Отходы производства, отходы потребления от населения, объектов социальной инфраструктуры, объектов IV-й категории* по уровню НВОС и ИП |
| 3 | V | ППК РЭО – российский экологический оператор | создан Постановлением Правительства РФ «О публично-правовой компании по формированию комплексной системы обращения с твердыми коммунальными отходами «Российский экологический оператор» | Отходы производства, отходы потребления (в частности, ТКО**) от населения, объектов социальной инфраструктуры, объектов IV-й категории по уровню НВОС и ИП |
| | | РО – Региональный оператор | осуществляет полный комплекс услуг по обращению с ТКО на территории субъекта федерации, выбирается в ходе регионального конкурсного отбора | ТКО, образующиеся вне помещений |

Примечание: *за основу систематизации в сфере дифференцированного подхода к экологическим требованиям и регламентации деятельности объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (НВОС), согласно статье 4.2 Федерального закона «Об охране окружающей среды», принято их разделение на четыре категории в зависимости от уровня НВОС (значительное, умеренное, незначительное и минимальное). К IV-й категории соответственно относятся объекты, оказывающие минимальное НВОС. **ТКО – твердые коммунальные отходы.

Note: * According to Article 4.2 of the Federal Law “On Environmental Protection”, objects that have a negative impact on the environment (NDE) are divided into four categories based on the level of NDE (significant, moderate, minor, and minimal). The fourth category includes objects that have a minimal NDE. **Municipal solid waste.

работы рынка отходов целесообразно создание общедоступной информационно-поисковой системы в сфере промышленного симбиоза с возможностью самостоятельного создания участниками рынка кооперационных цепочек. Поставщиками информации должны стать органы власти, местного самоуправления, региональные операторы, утилизаторы отходов, а также образователи и потребители тех отходов, которые могут быть использованы при

производстве продукции. Создание рынков работ и услуг в сфере обращения с отходами также может быть полезно для выполнения положений распоряжений Правительства РФ от 28.08.2024 № 2330-р «Об утверждении перечней видов продукции (товаров), работ, услуг, производство, выполнение и оказание которых осуществляются с обязательным использованием определённой доли вторичного сырья в их составе» и № 589-р от 25.07.2017

«Об утверждении перечня видов отходов производства и потребления, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается».

Для обращения отходов потребления III и IV классов опасности, образующихся у населения, объектов социнфраструктуры, объектов IV-й категории по уровню НВОС и ИП, вопросы управления пока до конца не решены и требуют уточнения.

3 группа – отходы V класса опасности (практически неопасные отходы). Управление отходами производства V класса опасности осуществляется самими отходообразователями, и в настоящее время, как уже было сказано выше, для эффективности работ по их утилизации требуется создание рынка отходов.

Потоки отходов потребления V класса опасности в основном управляются структурами, контролируруемыми государственными органами на региональном уровне. Однако, из таблицы 1 можно видеть, что в регулировании этой сферы участвует также Российский экологический оператор, контролируемый государственными органами федерального уровня. В отношении отходов V класса опасности ТКО также имеется ряд проблемных вопросов, связанных как с самим определением ТКО, так и с источниками их образования и с системой сбора и накопления.

Таким образом, можно отметить, что в каждой из трёх групп отходов можно выделить виды отходов и категории отходообразователей, относительно которых в системе управления отходами, основанной лишь на экологической классификации по уровню опасности, имеются недостаточно корректные позиции. Поэтому в каждой из указанных групп отходов требуются дополнительные управленческие решения, связанные с классификацией отходов по видам и источникам их образования.

Проблемные вопросы по управлению отходами потребления 1-й и 2-й групп отходов. Анализ нормативной базы и правоприменительной практики показал, что в управлении образующимися опасными отходами потребления (ртутьсодержащие, аккумуляторные батареи, химические источники тока и т. д.) от объектов социнфраструктуры, жилого фонда, объектов IV-й категории по уровню НВОС и ИП, наряду с уполномоченными федеральными структурами, должны также участвовать региональные органы власти и органы местного самоуправления. Это объясняется тем, что для указанных выше отходообразователей вызывает трудности обращение (особенно лицен-

зируемые виды деятельности – организация и обеспечение сбора, накопления и передачи опасных отходов на утилизацию) с отработанными ртутными люминесцентными лампами, которые до сих пор активно используются, поскольку капитальные ремонты помещений с заменой систем освещения на более современные светодиодные лампы обычно десятилетиями не проводятся. Продолжительность горения ртутных люминесцентных ламп находится в диапазоне от 5000 до 15000 ч, поэтому они ещё какое-то время будут востребованы и, соответственно, потребуются обеспечение их безопасной утилизации. В таблице 2 приведены справочные данные по некоторым широко используемым люминесцентным лампам [2].

К ртутьсодержащим отходам I класса опасности относятся также рефлекторные, бактерицидные, эритемные и некоторые другие виды ламп, ртутные термометры и другие приборы.

Относительно управления такими отходами следует учитывать, что наряду с основным законодательным актом по обращению с отходами, где в основу положена классификация отходов по уровню опасности, в этой сфере действует Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». В его развитие принято постановление Правительства РФ от 28.12.2020 № 2314 «Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде» (далее – Правила № 2314). В этих документах уточнены конкретные ртутьсодержащие виды отходов, а именно, отработанные ртутьсодержащие лампы – ртутьсодержащие отходы, представляющие собой отходы от использования товаров с ртутным заполнением и содержанием ртути не менее 0,01 %, утративших свои потребительские свойства (люминесцентные лампы с холодным катодом, люминесцентные лампы с внешним электродом, лампы люминесцентные малогабаритные, лампы люминесцентные трубчатые, лампы общего освещения ртутные высокого давления паросветные). Также в пункте 4 Правил № 2314 отмечаются вышеупомянутые отходообразователи и возможные места накопления

Таблица 2 / Table 2

Характеристика ртутных люминесцентных ламп / Characteristics of mercury fluorescent lamps

| Тип лампы Lamp type | Средняя продолжительность горения, час / The average gorenje duration, hour | Масса, г Weight, g | Дополнительные характеристики Additional features |
|------------------------|---|-----------------------|---|
| ЛБ 13 | 7500 | 75 | представляют собой стеклянную цилиндрическую трубку-колбу с впаянными ножками-катодами на концах (кроме ламп, указанных ниже). Содержание ртути в люминесцентных лампах 0,15 масс. % В условных обозначениях: первая буква (Л) – люминесцентная; последующие – Д – дневная, Б – белая, ХБ – холодно-белая, ТБ – тепло-белая, Ц – цветовой фон (улучшенная цветопередача), Р – с рефлекторным отражающим слоем. Цифры – мощность, Вт |
| ЛГ 20 | 7500 | 170 | |
| ЛБ 40 | 12000 | 210 | |
| ЛБ 65 | | 290 | |
| ЛБ 80 | | 450 | |
| ЛДЦ 40 | | 340 | |
| ЛДЦ 80 | | 450 | |
| ЛТБ 80 | | 450 | |
| ЛД 20 | 13000 | 170 | |
| ЛТБ 20 | | 170 | |
| ЛД 16 | 15000 | 118 | |
| ЛД 40 | | 20 | |
| ЛБ 20-1 | | 170 | |
| ЛТБ 15 | | 1118 | |
| ЛТБ 40-1 | | 320 | |
| КЛ7/ТБЦ | 5000 | 40 | компактные люминесцентные лампы малой мощности с односторонним цоколем |
| КЛ11/ТБЦ | | 55 | |
| КЛ36/ТБЦ | | 670 | |
| ДРЛ125(8) | 12000 | 107 | представляют собой колбы высокого давления, наполненные инертным газом и дозированным количеством ртути (0,01–0,03 масс. %) |

отработанных ртутьсодержащих ламп, образующихся у потребителей-собственников и нанимателей помещений в многоквартирных домах. Нормы Правил № 2314 предполагают, что лица, осуществляющие управление многоквартирными домами, на основании заключённого договора должны организовать сбор, накопление и передачу таких отходов, поскольку это входит в минимальный перечень услуг и работ, необходимых для обеспечения надлежащего содержания общего имущества в соответствии с пунктом 26(2) Постановления Правительства РФ от 03.04.2013 № 290 «О минимальном перечне услуг и работ, необходимых для обеспечения надлежащего содержания общего имущества в многоквартирном доме, и порядке их оказания и выполнения».

Относительно экономических аспектов при управлении опасными отходами от населения, объектов социнфраструктуры, объектов IV-й категории по уровню НВОС и ИП, можно отметить, что в соответствии с частью 1 статьи 39 Жилищного кодекса РФ собственники помещений в многоквартирном доме сами несут бремя расходов на содержание общего имущества, поэтому организация накопления отходов I–IV классов опасности (в том

числе отработанных ртутьсодержащих ламп) осуществляется за счёт средств проживающих в них граждан. При этом не обоснованно не рассматриваются объекты социнфраструктуры, субъекты малого бизнеса и предприниматели (собственники и арендаторы помещений в таких домах), которые так или иначе тоже должны нести экономическую нагрузку за утилизацию образующихся в результате их деятельности опасных отходов.

В случаях, когда обеспечение создания мест накопления отработанных ртутьсодержащих ламп не представляется возможным в силу отсутствия помещений для организации мест накопления, а также во всех остальных случаях (когда отработанные ртутьсодержащие лампы образуются у физических лиц, проживающих в частном секторе) органы местного самоуправления должны организовать создание мест накопления отработанных ртутьсодержащих ламп, а также проинформировать потребителей о расположении таких мест (пункт 5 Правил № 2314). Следовательно, в целях их последующей передачи оператору для транспортирования, обработки, утилизации, обезвреживания и хранения органы местного самоуправления должны заключить

с таким оператором соответствующий договор, оплату которого осуществляют за счёт бюджетных средств [3]. Общие подходы к управлению и проблематике в сфере обращения использованных ртутных ламп от населения, объектов IV-й категории по уровню НВОС и ИП различных отраслей (субъектов экономики) сведены в таблицу 3.

Аналогичные проблемы можно отметить и при обращении других видов опасных отходов потребления, с большой долей вероятности периодически образующихся у населения, объектов социнфраструктуры и субъектов экономики IV-й категории. В этой связи целесообразно рассмотреть Приказ Минприроды России от 11.06.2021 № 399 «Об утверждении требований при обращении с группами однородных отходов I–V классов опасности» (Приказ № 399), где отходы сгруппированы по видам однородных отходов. Согласно законодательству они классифицируются по одному или нескольким признакам (происхождению, условиям образования, химическому и (или) компонентному составу, агрегатному состоянию и физической форме). Для правомерного обращения отражённых в Приказе № 399 отходов сформулированы специальные требования, соблюдение которых обеспечивает реализацию приоритетных направлений государственной политики в области обращения с отходами производства и потребления.

В таблице 4 отражены группы однородных отходов, обращение которых регламентировано в соответствии с Приказом № 399, где гражданам, как потенциальным отходообразователям, предписано передавать данные отходы только юридическим лицам и ИП, осуществляющим на законных основаниях деятельность по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и хранению таких видов отходов. Однако, также, как и в случае с ртутными лампами, понятный и доступный механизм сбора, накопления и передачи на утилизацию образующихся у населения такого рода отходов в настоящее время отсутствует. При этом следует отметить, что региональные власти, органы местного самоуправления и крупные торговые сети зачастую проводят различные акции по сбору некоторых опасных отходов (ртутьсодержащих ламп, батареек – химических источников тока, бытовых электроприборов и т. д.), однако системно проблема пока не решена.

Проблемные вопросы по 3-й группе отходов (неопасные отходы V класса опасности). В отношении таких отходов также имеется ряд проблемных вопросов, в частности, например, при обращении с ТКО. Следует учитывать, что к ТКО наряду с отходами потребления от населения дополнительно законодательно отнесены отходы производства, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, ИП

Таблица 3 / Table 3

Проблемы в управлении обращением ртутьсодержащих осветительных приборов от населения и субъектов экономики, расположенных в жилых районах / Problems in managing the circulation of mercury-containing lighting devices from the population and economic entities located in residential areas

| Отходообразователь Waste-forming agent | Проблемные вопросы обращения с ртутьсодержащими лампами Problems with handling mercury-containing lamps | Основные отрицательные аспекты The main negative aspects |
|---|---|--|
| Население многоквартирных домов, имеющее возможность собирать и накапливать ртутные лампы | Самостоятельное создание мест накопления отработанных ртутьсодержащих ламп и передача в ФГУП «ФЭО» | Утрата инвестиционной привлекательности помещений общего пользования и необходимость привлечения дополнительных расходов населения на утилизацию |
| Население многоквартирных домов, не имеющее возможность собирать ртутные лампы | Форма участия органов местного самоуправления – организация и создание общих мест накопления отработанных ртутьсодержащих ламп и других опасных отходов | Отсутствие статистических данных об объёмах образующихся отходов и недостаточность финансовых средств у муниципалитетов на организацию сбора отходов и передачи в ФГУП «ФЭО» |
| Субъекты экономики, арендующие помещения в многоквартирных домах | В нормативных документах не предусмотрен порядок сбора в местах нахождения субъекта | Отсутствие должного контроля за сбором и сдачей на утилизацию |
| Субъекты экономики, собственники помещений в многоквартирных домах | Система учёта отходов, территориально не связанная с микрорайонном размещении | Отсутствие должного контроля за сбором и сдачей на утилизацию |

Таблица 4 / Table 4

Группы однородных отходов / Homogeneous waste groups

| Группа однородных отходов Homogeneous waste groups | Код ФККО FKKO code | Наименование согласно ФККО Name according to FKKO |
|--|-----------------------|--|
| Отходы аккумуляторов и аккумуляторных батарей транспортных средств | 9 20 110 00 00 0 | Отходы аккумуляторов свинцово-кислотных |
| | 9 20 120 00 00 0 | Отходы аккумуляторов никель-кадмиевых |
| | 9 20 130 00 00 0 | Отходы аккумуляторов никель-железных |
| Минеральные и синтетические масла, утратившие потребительские свойства | 4 06 100 00 00 0 | Отходы минеральных масел, не содержащих галогены |
| | 4 06 320 00 00 0 | Смеси масел минеральных отработанных |
| | 4 13 000 00 00 0 | Отходы синтетических и полусинтетических масел и гидравлических жидкостей |
| Батареи и аккумуляторы, утратившие потребительские свойства, кроме аккумуляторов для транспортных средств | 4 82 200 00 00 0 | Батареи и аккумуляторы, утратившие потребительские свойства, кроме аккумуляторов для транспортных средств, вошедших в Блок 9 ФККО |
| Оборудование компьютерное, электронное, электрическое, оптическое, утратившее потребительские свойства | 4 73 000 00 00 0 | Отходы оборудования, содержащего озоноразрушающие вещества |
| | 4 81 000 00 00 0 | Оборудование компьютерное, электронное, оптическое, утратившее потребительские свойства за исключением групп видов отходов с кодами 4 82 200 00 00 0, 4 82 410 00 00 0, 4 82 902 00 00 0 |
| Отходы шин, покрышек, камер (утратившие потребительские свойства, а также шины, покрышки, камеры, собственники которых признали их отходами) | 9 21 100 00 00 0 | Отходы шин, покрышек, камер автомобильных |
| | 9 23 111 11 52 4 | Шины и покрышки пневматические для использования в авиации отработанные |
| | 9 23 000 00 00 0 | Прочие отходы обслуживания и ремонта авиатранспорта |
| Отходы электролитов аккумуляторов и аккумуляторных батарей | 9 20 200 00 00 0 | Отходы электролитов аккумуляторов и аккумуляторных батарей |

и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также эпидемиологически безопасные медицинские отходы, приближённые по составу к ТКО.

Исходя из этого, в настоящее время повышенного внимания требуют вопросы урегулирования обращения с медицинскими отходами класса «А» (эпидемиологически безопасные отходы, приближённые по составу к ТКО), которые с 01.07.2025 г. законодательно приравниваются к ТКО. Относительно перечня медицинских отходов, приравненных к ТКО, примерный перечень таких отходов включает: канцелярские принадлежности (бумага, ручки, папки); упаковка от лекарств и изделий (картон, пластик без биозагрязнений); пищевые отходы из столовых для персонала и неинфекционных отделений; смёт с территории лечебно-профилактических учреждений (ЛПУ); одноразовые пелёнки, подгузники, салфетки без следов биологических жидкостей; мебель и инвентарь, потерявшие

потребительские свойства [4]. Такого рода отходы производства и потребления образуются и накапливаются в медицинских учреждениях и далее должны передаваться по договору региональным операторам по обращению с ТКО. С момента передачи медицинских отходов класса «А», а именно складирования в месте (площадке) накопления ТКО, на данные отходы распространяются требования ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998 и они регулируются как ТКО. При этом, учитывая, что запрет, установленный подпунктом «а» пункта 36 Правил обращения с ТКО, утверждённых постановлением Правительства Российской Федерации от 07.03.2025 № 293 и вступивших в силу с 01.09.2025 г., связанный с невозможностью их накопления в контейнерах на площадке ТКО, на них не распространяется. Поэтому медицинские учреждения могут пользоваться близлежащими контейнерными площадками при условии заключения договора с соответствующими операторами. Однако,

операторы вправе потребовать подтверждения отнесения таких отходов к V классу в соответствии с Приказом Минприроды России от 08.12.2020 № 1027 «Об утверждении порядка подтверждения отнесения отходов I–V классов опасности к конкретному классу опасности», поскольку они осуществляют деятельность по обращению с медицинскими отходами класса «А» в рамках полномочий, установленных ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998.

Анализируя примерный перечень медицинских отходов класса «А», следует также учитывать, что перечисленные позиции отходов требуют дальнейшей детализации для их обращения в так называемом правовом экологическом поле. Так, например, указываемый в публикациях [4] уличный смёт с территории ЛПУ, равно как и смёт с любой другой территории, складировать на площадках ТКО нельзя, а потерявшие свои потребительские свойства мебель и инвентарь могут относиться к крупногабаритным отходам (КГО), которые должны накапливаться отдельно в специальных контейнерах для КГО.

Относительно медицинских отходов класса «А» необходимо также чёткое понимание процедур учёта и контроля таких отходов. Согласно письму МПР от 14 июля 2025 г. № 25-47/29127 по вопросу обращения с медицинскими отходами класса «А» следует, что исходя из положений подпункта 1 пункта 10 статьи 22.1 ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» учёт медицинских отходов осуществляется ИП, юридическими лицами, в результате деятельности которых образуются медицинские отходы. Согласно пункту 12 статьи 22.1 указанного закона порядок учёта медицинских отходов, включая состав сведений, подлежащих передаче в федеральный орган исполнительной власти, осуществляющий федеральный государственный санитарно-эпидемиологический контроль (надзор), и порядок информационного взаимодействия при передаче данных сведений устанавливаются Правительством РФ. Вместе с тем, исходя из положений пункта 1 статьи 19 ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998 ИП и юридические лица, осуществляющие деятельность в области обращения с отходами, обязаны вести в установленном порядке учёт образовавшихся, обработанных, утилизированных, обезвреженных, переданных другим лицам или полученных от других лиц, а также размещённых отходов. Порядок учёта в области обращения с отходами утверждён Приказом Минприроды России от 08.12.2020 № 1028 (далее – Порядок

№ 1028). Таким образом, лица, в результате деятельности которых образуются медицинские отходы класса «А», должны вести учёт медицинских отходов класса «А» в порядке, предусмотренном подпунктом 1 пункта 10 статьи 22.1 Закона № 52-ФЗ, а также вести учёт образовавшихся ТКО – эпидемиологически безопасных медицинских отходов, приближённых по составу к ТКО в соответствии с Порядком № 1028.

Относительно управления 3-й группой отходов, обозначенной в таблице 1, кроме обращения медицинских отходов, проблемными являются также вопросы первичной идентификации ТКО и совместного использования контейнерных площадок ТКО, расположенных в жилых микрорайонах.

Идентификация ТКО производится согласно формулировке ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998, а именно: «твёрдые коммунальные отходы – отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд...», а также образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, ИП и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления населением. То есть законодательно закреплённая формулировка ТКО относится к отходам, образующимся только в помещениях. Однако, при этом ФККО содержит раздел в блоке 7, посвящённый ТКО, где кроме отходов, образующихся в помещении, также обозначены, например, отходы от уборки территории городских и сельских поселений (7 31 200 00 00 0); мусор и смёт уличный (7 31 200 01 72 4); мусор и смёт от уборки парков, скверов, зон массового отдыха, набережных, пляжей и других объектов благоустройства (7 31 200 02 72 5); отходы от уборки территорий кладбищ, колумбариев (7 31 200 03 72 504); отходы от уборки прибордюрной зоны автомобильных дорог (7 31 205 11 72 4); отходы от зимней уборки улиц (7 31 210 00 00 0); растительные отходы при уходе за газонами, цветниками, древесно-кустарниковыми посадками, относящиеся к ТКО (7 31 300 00 00 0). Эти отходы не в полной мере соответствуют определению ТКО, установленному ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998, по основному признаку, так как являются отходами, образованными вне жилых помещений и не в результате общественного или личного потребления. При этом согласно разъясне-

ниям специально уполномоченных органов, ФККО не является НПА, относящим отходы к ТКО, а является перечнем видов отходов, образованных у ИП и юридических лиц в процессе их деятельности. В связи с этим, можно заключить, что управление обращением ТКО, образованных вне помещений, требует дополнительного урегулирования. При этом следует отметить, что в соответствии с пунктом 36 Правил обращения с ТКО имеется прямой запрет на складирование в контейнеры для ТКО, в том числе, только лишь некоторых вышеперечисленных образованных вне помещений отходов – снега, льда и образовавшихся при уходе за древесно-кустарниковыми посадками отходов.

Обозначенная выше проблема совместного использования расположенных в жилых микрорайонах контейнерных площадок для складирования ТКО заключается также и в том, что вторая часть определения ТКО относительно образующихся отходов от деятельности юридических лиц и ИП (это касается также и лечебных заведений, которые образуют эпидемиологически безопасные медицинские отходы, приближенные по составу к ТКО) предполагает возможность складирования отходов в контейнеры для ТКО совместно с населением. Однако, юридические лица и ИП, расположенные в жилых микрорайонах и не имеющие собственной контейнерной площадки, зачастую используют эту ситуацию для несанкционированного бесконтрольного складирования отходов, в состав которых входят полезные компоненты, захоронение которых запрещается, а также опасных отходов потребления I–IV класса опасности. При обезличенности мест складирования ТКО на общих с населением контейнерных площадках для таких отходообразователей (юридических лиц и ИП, расположенных в жилых районах) затруднен контроль соблюдения условий договора на оказание услуг по обращению с ТКО.

Кроме того, если раздельный сбор отходов (РСО) жизнедеятельности населения является пока добровольным, то юридические лица и ИП обязаны соблюдать все нормативные требования в сфере обращения с отходами, направленные на безопасное и рациональное использование отходов, а также организационно и экономически участвовать в их утилизации.

Выводы

1. Анализ нормативно-правового обеспечения и правоприменительной практики

в сфере обращения отходов производства и потребления показал, что, руководствуясь только классификацией, в основу которой положен класс опасности отхода, определённый согласно ФЗ № 89-ФЗ от 24.06.1998 и соответствующих принятых в его развитие НПА, не в полной мере удовлетворяет современным требованиям для безопасного и рационального решения вопросов управления потоками отходов.

2. При обращении с отходами производства и потребления в управленческом контексте целесообразно комплексно на междисциплинарной основе учитывать нормы следующих федеральных законов:

ФЗ от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»;

ФЗ от 24.06.98 № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»;

ФЗ от 23.11.2009 № 264-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»;

ФЗ от 30.03.1999 № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;

Жилищный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 188-ФЗ;

ФЗ от 04.05.2011 № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности».

3. Требуется уточнения форма участия органов местного самоуправления в регулировании вопросов обращения образующихся при жизнедеятельности населения отходов I–IV классов опасности.

4. Относительно отходов производства всех классов опасности следует учитывать, что концепция экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ) в последние годы стала одним из основных стратегических приоритетов устойчивого развития, поэтому для выполнения этой задачи целесообразно создавать рынок отходов, работ и услуг в сфере их утилизации. Заинтересованными участниками (экономическими контрагентами) рынка должны стать образователи, потенциальные потребители, а также переработчики отходов. Для эффективной работы рынка отходов целесообразно создание общедоступной информационно-поисковой системы в сфере промышленного симбиоза с возможностью самостоятельного создания участниками рынка кооперационных цепочек. Поставщиками информации должны стать органы власти, местного самоуправления, региональные операторы, утилизаторы отходов, а также образователи и потребители отходов,

которые могут быть использованы при производстве продукции.

5. Требуется усиление контроля за обращением приравненных к ТКО отходов производства и потребления, образующихся у юридических лиц и ИП, которые совместно с населением пользуются контейнерными площадками для их складирования. При этом форма участия юридических лиц и ИП в вопросах организации и финансирования процессов сбора, накопления и передачи на утилизацию запрещённых к захоронению и опасных отходов потребления должна быть усовершенствована.

Литература

1. Мусихина Т.А., Легостаева О.А. Современные подходы к регулированию сферы обращения с отходами в контексте региональной экономики замкнутого цикла // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). 2025. № 1. С. 96–97.

2. Островский Н.В. Обращение с отходами. 2-е изд. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К^о», 2021. 538 с.

3. Мусихина Т.А., Земцова Е.А. Управление потоками отходов потребления в Российской Федерации

цикла // Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник). 2023. № 1. С. 124–126.

4. Медицинские отходы: что изменится с 01.07.2025 [Электронный ресурс] <https://journal.ecostandard.ru/eco/praktikum/meditsinskie-otkhody-chno-izmenitsya-s-1-iyulya-2025-goda-/?ysclid=mnoh8s2dho386428474> (дата обращения: 07.04.2026).

References

1. Musikhina T.A., Legostaeva O.A. Modern approaches to waste management regulation in the context of a regional closed-loop economy // Science. Engineering. Technology (Polytechnical Bulletin). 2025. No. 1. P. 96–97 (in Russian).

2. Ostrovskiy N.V. Waste management. 2nd edition. Moskva: Izdatelsko-torgovaya korporatsiya “Dashkov i K^o”, 2021. 538 p. (in Russian).

3. Musikhina T.A., Zemtsova E.A. Waste consumption stream management in the Russian Federation // Science. Engineering. Technology (Polytechnical Bulletin). 2023. No. 1. P. 124–126 (in Russian).

4. Medical waste: what will change from July 1, 2025 [Internet recourse] <https://journal.ecostandard.ru/eco/praktikum/meditsinskie-otkhody-chno-izmenitsya-s-1-iyulya-2025-goda-/?ysclid=mnoh8s2dho386428474> (дата обращения: 07.04.2026).

**«Экология родного края: проблемы и пути их решения»:
итоги работы III Международной научно-практической конференции**

© 2026. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,
М. Л. Сазанова², к. б. н., доцент, н. с.,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ecolab2@gmail.com

**“Home country ecology: problems and solutions”:
III International scientific and practical conference outcomes**

© 2025. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047
M. L. Sazanova² ORCID: 0000-0003-3492-8395
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

22–23 апреля 2026 г. в Вятском государственном университете (ВятГУ) проведена III Международная научно-практическая конференция «Экология родного края: проблемы и пути их решения».

Организаторами конференции выступили ВятГУ, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, Ляонинский институт науки и технологии (г. Бэньси, провинция Ляонинь, Китайская Народная Республика), региональный оператор по обращению с твёрдыми коммунальными отходами в Кировской области – АО «Куприт». Мероприятия конференции проходили при поддержке Министерства охраны окружающей среды Кировской области, Общественной палаты Кировской области, Союза «Вятская торгово-промышленная палата», Филиала «КЧХК» АО «ОХК «УРАЛХИМ» (г. Кирово-Чепецк), ООО НВП БашИнком (г. Уфа).

В работе конференции приняли участие 340 специалистов из 77 научных, образовательных и природоохранных организаций и предприятий России, ближнего (Беларусь, Таджикистан, Узбекистан) и дальнего зарубежья (Китай, Индия).

География 282 российских участников охватила 25 населённых пунктов: города Архангельск, Владивосток, Воронеж, Глазов, Донецк, Ижевск, Казань, Киров, Кирово-Чепецк, Кострома, Москва, Пермь, Пущино, Ростов-на-Дону, Рязань, Санкт-Петербург, Сибай, Сыктывкар, Томск, Тула, Улан-Удэ, Уфа, Ярославль, пос. Борок Ярославской области, пос. Терней Приморского края. Среди организаций были представлены научно-исследовательские учреждения (Институты агробиотехнологий, биологии, физиологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Казанский научный центр РАН, Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого, Всероссийский НИИ ветеринарной энтомологии и арахнологии – филиал ТюмНЦ СО РАН и др.), образовательные организации (Воронежский, Донецкий, Тульский, Тюменский, Удмуртский, Ярославский государственные университеты и др.), производственные предприятия (ООО «Экоаудит», АО Чепецкий механический завод, ООО «АгроТрансПорт», ООО «НВП «БашИнком» и др.).

На секциях прозвучали доклады белорусских авторов из Гомеля (Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины), Витебска, Минска (Институт природопользования НАН Беларуси, Институт экспериментальной ветеринарии им. С. Н. Вышелеского), Могилёва (Белорусско-Российский университет). В конференции традиционно участвовали представители Института энергетики Таджикистана, впервые приняли участие сотрудники Худжандского государственного университета имени академика Бободжона Гафурова. Республика Узбекистан была представлена Гулистанским государственным университетом и Институтом зоологии Академии наук Узбекистана.

18 участников из Индии представили университет доктора С. В. Рамана (Кхандва), Королевский колледж фармацевтического образования и исследований (Малегаон), Университет Уильяма Кэри (Мегхалайя). Доклады из Китайской народной республики были от сотрудников Ляонинского института науки и технологии (Бэньси) и Института исследований металлов Китайской академии наук (Шэньян).

22 апреля конференцию открыл и поприветствовал её участников заместитель Председателя Правительства Кировской области Ю.И. Терешков. С приветствием выступили министр охраны окружающей среды Кировской области Т.Э. Абашев, вице-президент Ляонинского института науки и технологии Гэ Хуэйци, заместитель директора Института биологии Коми НЦ УрО РАН Б.М. Кондратёнок, проректор по международной деятельности ВятГУ С.Г. Фомин, председатель Общественной палаты Кировской области С.Н. Улитин, вице-президент ВТПП Кировской области Л.И. Перминов, зам. генерального директора АО «Куприт» В.П. Пересторонин.

В программу конференции было включено проведение круглого стола по теме «Актуальные проблемы плодородия почв Нечерноземной зоны». В ходе дискуссии учёные обсудили современные подходы к агрохимическим исследованиям, а также перспективы развития сельского хозяйства региона. С очень ценными, глубокими и аналитическими докладами выступили участники круглого стола. Учёных из Института биологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) представили: Е.М. Лаптева, О.В. Броварова, Ю.А. Смотрина. Особый интерес участников круглого стола вы-

звали доклады учёных г. Кирова: В.В. Митина – директора Кировского филиала ФГБУ «РосАгрохимслужба» по теме «Актуальные проблемы плодородия почв Кировской области» и А.С. Бусыгина – начальника отдела агроэкологического мониторинга данного учреждения по теме «Эффективность применения селеновых удобрений на почвах северо-восточного Нечерноземья». В заседании круглого стола приняли участие представители Министерства сельского хозяйства и продовольствия Кировской области С.В. Матанцева, О.А. Паладич. Было отмечено, что при обработке почв и внесении удобрений необходимо учитывать их воздействие на почвенную микробиоту. Применяемые дозы удобрений не должны оказывать угнетающее воздействие на почвенные микроорганизмы и выполняемые ими экологические функции. Особое внимание было уделено практическим рекомендациям по сохранению и восстановлению плодородия почв, что имеет важное значение для устойчивого развития агропромышленного комплекса.

В ходе пленарной сессии 22 апреля с пленарными докладами выступили специалисты из вузов и НИИ Санкт-Петербурга, Кирова, Сыктывкара. Большой интерес вызвал пленарный доклад Н.А. Никоновой «Задачи развития национального органического сельского хозяйства в свете современных экологических проблем» (Санкт-Петербургский ФИЦ РАН). Органическое сельское хозяйство сочетает в себе как традиционные методы ведения хозяйства, так и современные научно-технические разработки и инновационные технологии, которые, принимая во внимание местные условия и опираясь на экологические циклы, позволяют сохранить плодородие почв и биологическое разнообразие, не используя компоненты, способные нанести вред окружающей среде. Автор доклада отметила, что, несмотря на формирование нормативно-правовой базы (ГОСТ 33980-2016, Федеральный закон № 280-ФЗ от 03.08.2018) и другие институциональные предпосылки для интеграции органического производства в государственную аграрную политику, темпы его развития недостаточны. Предложен комплекс мер, который позволит рассматривать органическое сельское хозяйство не как нишевый сегмент, а как важный инструмент решения современных экологических проблем аграрного сектора и перехода к устойчивой модели продовольственной системы.

Всего на конференции были заслушаны 93 доклада по следующим направлениям:

– экологические проблемы регионов, пути решения;

– экологический мониторинг состояния окружающей среды;

– химия и экология почв;

– химия и экология микроорганизмов;

– биология и экология растений;

– биология и экология животных;

– социальная экология и здоровье;

– химия природного сырья и контроль качества фармацевтических субстанций;

– отходы производства и потребления: экологические аспекты;

– экологическое образование и воспитание.

Внутренний спектр секционных заседаний дополнен новой секцией «Химия природного сырья. Контроль качества фармацевтических субстанций». На ней были рассмотрены различные аспекты химии природного сырья, в первую очередь, растительного, а также вопросы контроля качества лекарственных препаратов и прекурсоров. На секции выступили молодые учёные – студенты, магистранты, аспиранты, которые занимаются углублённым изучением химического состава природного сырья, разработкой новых методов его переработки и, в целом, расширением номенклатуры сырья для отечественной фармацевтической промышленности. Данное направление является актуальным в настоящее время, так как значительная доля фар-

мацевтических субстанций (антибиотики, алкалоиды, сердечные гликозиды и др.) либо созданы на основе природных молекул, либо синтезированы по их лекалам. Помимо этого, фокус разработки новых лекарственных средств сместился на местное сырьё, реализуется курс на достижение технологического суверенитета России. Это требует разработки новых национальных методик контроля качества фармацевтической продукции. По данным областного правительства (<https://www.kirovreg.ru>), в 2025 г. фармацевтическая и химическая промышленность региона демонстрируют устойчивую динамику роста, в первую очередь, за счёт расширения линейки производимой продукции, и укрепляют позиции Кировской области.

При подведении итогов научно-практической конференции её участники отметили актуальность тематики представленных докладов по решению экологических проблем регионов, выразили уверенность в необходимости проведения дальнейших исследований, отметили важность взаимодействия научных и административных институтов в данном направлении. Материалы конференции опубликованы в сборнике научных трудов (в двух книгах) и размещены на сайте конференции <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php> и на платформе научной электронной библиотеки elibrary.ru.

III Международная научно-практическая конференция «Экология родного края: проблемы и пути их решения» г. Киров, 22–23 апреля 2026 г.



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004