



2026

*Теоретическая
и прикладная*

ЭКОЛОГИЯ

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

№ 3

**Theoretical and
Applied Ecology**



**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ**

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

**МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ
И АНТРОПОГЕННО
НАРУШЕННЫХ
ТЕРРИТОРИЙ**

**ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ
СРЕД И ОБЪЕКТОВ**

**ЭКОЛОГИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА**

АГРОЭКОЛОГИЯ

**РЕМЕДИАЦИЯ И
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ**

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

<http://envjournal.ru>



ИНВЕСТИЦИИ В ЭКОЛОГИЮ: КАК АГРОХОЛДИНГ «ДОРОНИЧИ» РЕАЛИЗУЕТ УСПЕШНЫЕ ПРАКТИКИ

ДОРОНИЧИ

АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ ХОЛДИНГ

Агрохолдинг «Дороничи» вкладывает значительные ресурсы в природоохранные технологии. Предприятия холдинга ведут постоянную работу, направленную на снижение негативного воздействия на окружающую природную среду. Среди основных направлений работы:

1. Инвестиции в научные проекты. Совместно с ВятГУ на протяжении 5 лет ведутся научно-исследовательские работы, направленные на внедрение технологического решения по устранению специфического запаха. В результате было установлено, что ключевым фактором является аэрация – принудительное насыщение кислородом жидких отходов в накопительных лагунах перед их внесением в почву. В 2026 г. технология внедрена на свиноводческих комплексах в п. Дороничи и с. Русское. В промышленную эксплуатацию введено 9 миксеров-аэраторов, общая стоимость которых составила 26 млн рублей.

2. Внедрение биогазовых технологий. С 2023 г. агрохолдинг реализует проект по внедрению биогазовых технологий совместно с ООО «СельхозБиоГаз». Процесс обеспечивает уничтожение патогенной микробиоты, нейтрализацию запахов и получение качественного органического удобрения.

В 2026 г. для реализации проекта приобретена установка СБГ-10 мощностью

10 м³ в сутки. Объем инвестиций составил 22 млн рублей.

3. Строгое соблюдение норм при внесении удобрений. Внесение побочных продуктов животноводства (ППЖ) на поля производится внутрпочвенным методом. Процесс регламентирован соблюдением утвержденных норм внесения и санитарных разрывов до жилой застройки, лесных массивов, дорог и водных объектов. Постоянный производственный контроль за соблюдением регламента осуществляют специалисты холдинга.

4. Подбор препаратов для снижения запахов. Предприятиями проводятся производственные эксперименты по применению препаратов для снижения запахов разного принципа действия.

5. Информирование общественности и мониторинг воздуха. До начала работ по внесению ППЖ осуществляется официальное уведомление территориальных управлений для информирования жителей г. Кирова и области. Обеспечивается непрерывный производственный мониторинг качества атмосферного воздуха.

6. Повторная переработка отходов. Предприятия холдинга передают образующиеся в ходе производственной деятельности использованные материалы на повторную переработку (канистры, плёнка, картон).

Агрохолдинг «ДОРОНИЧИ» –

один из крупнейших вертикально интегрированных производителей полного цикла в Приволжском федеральном округе

- 9 направлений деятельности
- 7000 сотрудников
- входит в ТОП-6 производителей молока и ТОП-20 производителей свинины в России
- >200 магазинов в 7 регионах России





Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 3, 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 (№ 2737 по состоянию на 15.09.2026).

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: 29.09.2026.

Тираж 250 экз. Заказ № 0368. 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. Литвинцев 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. Юнблюд д.и.н., профессор, президент
Вятского государственного университета



Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 3, 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. Dominina, 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: September 29, 2026.

Circulation 250 copies. Order No. 0368. 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. Kolomiychuk

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. Lazhentshev

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

A.A. Moskalev

Resource saving and technological Innovations of Mendeleev University of Chemical Technology

L.N. Olshanskaya

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

S.V. Pestov

of Surgery named after Academician B.V. Petrovsky

V.S. Petrosyan

Doctor in Chemistry, Professor, Professor of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

V.D. Poliksenova

PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University

S.A. Rubtsova

Doctor in Chemistry, Professor Emeritus of Lomonosov Moscow State University

V.P. Savinykh

PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Belarusian State University

V.A. Sysuev

Doctor in Chemistry, Senior Researcher, Director of the Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS

V.A. Terekhova

Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, President of Moscow State University

E.I. Tikhomirova

of Geodesy and Cartography

T.A. Trifonova

Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky

V.I. Kholstov

Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University

V.V. Shiryayev

Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

L.N. Shikhova

Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University

V.T. Yungblud

Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"

Doctor in Biology, Senior Researcher, Leading Researcher of Professor Zhitkov Russian Research Institute

of Game Management and Fur Farming

Doctor in Agricultural Sciences, Professor, Leading Researcher of Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky

Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРЫ

- Г. Д. Ватутин, Е. А. Филимонов** Потоки парниковых газов в приморских водноболотных экосистемах тропиков и субтропиков: обзор 6
- Н. А. Боков, И. Г. Широких** О применении искусственного интеллекта и больших языковых моделей в области почвенно-экологических исследований (обзор) 17

СТАТЬИ

- А. А. Перевощикова, Н. А. Кобелев, Т. С. Бачурин** Использование данных Landsat-8 для классификации выделения отвалов вскрышных пород 31
- Д. Б. Петренко, А. В. Ерёмкина, Н. В. Васильев, Е. В. Аристархова** Проточноинжекционное ионометрическое определение фторидов в биологических объектах с применением автоматической установки «Титрион» 39
- А. И. Фокина, М. А. Зайцев, С. С. Козачок, М. Ю. Кухно** Инверсионно-вольтамперометрическое определение антиоксидантов по степени снижения площади пика пероксида водорода 48
- Д. А. Голубев, Е. Ю. Платонова, Н. В. Земская, О. Г. Шевченко, М. В. Шапошников, П. С. Тумаева, С. А. Патов, А. А. Москалев** Влияние природного антоциана на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* и устойчивость к ионизирующему излучению 54
- Н. Э. Вебер, И. В. Груздев, О. Г. Шевченко, О. В. Скроцкая** Разработка методики одновременного определения жирных и фенольных кислот – ценных вторичных метаболитов плодов рябины (*Sorbus* L.) 65
- Е. А. Тишина, Т. С. Дроганова, Л. В. Поликарпова, Д. А. Арешидзе, Н. В. Васильев** Влияние пиретроидов на биохимические параметры и морфофункциональное состояние живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) 79
- Л. М. Кондратьева, Д. В. Андреева, З. Н. Литвиненко** Биоиндикация ртутного загрязнения Бурейского водохранилища после зимнего оползня 87
- Е. П. Черткова, Д. Г. Замолодчиков** Оценка средообразующих функций болотных экосистем Алтайского государственного природного биосферного заповедника 95
- Т. В. Шевкунова, С. С. Катин, Е. Н. Патова** Комплексная оценка качества питьевой воды на участках водозаборных сооружений 105
- И. В. Зыкова, В. А. Исаков, Н. М. Мишина, Я. Н. Мануриков** Адсорбция резорцина сорбентами на основе сапропеля 113
- М. А. Шумилова, Ф. Ф. Чаусов, Д. К. Жиров, К. А. Новожилов** О возможности применения винной кислоты и её солей при утилизации отработанных электролитов меднения 123
- М. С. Иванова, К. О. Томский** Очистка газовых выбросов нефтегазоконденсатных месторождений на гетерогенном катализаторе (на примере Среднеботуобинского месторождения) 131
- А. М. Кузьмин, Е. М. Гашевский** Эколого-экономическая эффективность малотоннажного производства метанола на основе газогенераторов синтез-газа 141

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

- Т. Ю. Коришнова, Л. А. Кульбаева, Е. В. Кузина, М. Г. Искужина, Г. Ф. Рафикова, С. Р. Мухаматдьярова* Модельный эксперимент по оценке влияния штамма-нефтедеструктора *Pseudomonas schmalbachii* N3.1 и растений-ремедиантов на биологическую активность загрязнённой нефтью и гербицидами почвы 154
- А. Д. Мошкин, О. В. Охлопкова, Л. С. Адаменко, А. В. Глушков, А. Ю. Алексеев, Р. Абдинов, А. А. Гаджиев, А. М. Шестопалов* Аэробная деградация углеводородов в холодных кислых почвах: геномное профилирование бактерий-деструкторов 164

АГРОЭКОЛОГИЯ

- А. А. Выприцкий, А. А. Хованская* Лесомелиоративная оценка защищённости сельскохозяйственных угодий в сухостепной природной зоне 173

ЭКОТОКСИ- КОЛОГИЯ

- А. М. Шеромов, Р. А. Ложкина, А. С. Олькова* Токсичность меди для *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894 в условиях повышенной минерализации и содержания органического вещества 184

ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

- Л. В. Веснина, Д. М. Безматерных, М. В. Лассый, Ю. А. Веснин* Продукционные характеристики артемии (Crustacea, Anostraca *Artemia* spp.) в озёрах разного типа минерализации на юге Западной Сибири 191
- В. И. Пономарев* Ихтиофауна и рыбное население водотоков национального парка «Койгородский» 200

ИНФОРМАЦИЯ

- Э. А. Крюкова* Менделеевская экологическая экспедиция объединила молодых исследователей из 14 городов России 208
- В. Н. Симаков* Город Киров – ядро Кировской городской агломерации: направления развития 210

CONTENTS

REVIEWS

THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY

- G. D. Vatutin, E. A. Filimonenko* Greenhouse gases fluxes from (sub)tropical blue carbon ecosystems: a review 6
- N. A. Bokov, I. G. Shirokikh* On the application of artificial intelligence and large language models in soil and environmental research: a review 17

ARTICLES

METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS

- A. A. Perevoshchikova, N. A. Kobelev, T. S. Bachurin* Using Landsat-8 data for classification and delineation of overburden dumps 31
- D. B. Petrenko, A. V. Eremina, N. V. Vasiliev, E. V. Aristarkhova* Flow-injection ionometric fluorides detection in biological objects using automatic device “Titron” 39
- A. I. Fokina, M. A. Zaitsev, S. S. Kozachok, M. Yu. Kukhno* Stripping voltammetric detection of antioxidants by the degree of reduction in the peak area of hydrogen peroxide 48
- D. A. Golubev, E. Y. Platonova, N. V. Zemskaya, O. G. Shevchenko, M. V. Shaposhnikov, P. S. Tumaeva, S. A. Patov, A. A. Moskaev* Effect of natural anthocyanin on *Drosophila melanogaster* lifespan and resistance to ionizing radiation 54

MONITORING OF NATURAL AND ANTHROPO- GENICALLY DISTURBED AREAS

N. E. Veber, I. V. Gruzdev, O. G. Shevchenko, O. V. Skrotskaya Development of a method for the simultaneous determination of fatty and phenolic acids – valuable secondary metabolites of rowan berries (*Sorbus* L.) 65

E. A. Tishina, T. S. Drogonova, L. V. Polikarpova, D. A. Areshidze, N. V. Vasiliev Pyrethroids effect on biochemical parameters and morphofunctional state of *Viviparus viviparus* L. 79

L. M. Kondratyeva, D. V. Andreeva, Z. N. Litvinenko Bioindication of mercury pollution in the Bureya Reservoir after the winter landslide 87

E. P. Chertkova, D. G. Zamolodchikov Evaluation of environment-forming functions of wetland ecosystems in the Altai State Nature Biosphere Reserve 95

CHEMISTRY OF NATURAL ENVIRONMENTS AND OBJECTS

T. V. Shevkunova, S. S. Katin, E. N. Patova Comprehensive assessment of drinking water quality at water intake sites 105

I. V. Zyкова, V. A. Isakov, N. M. Mishina, Ya. N. Manurikov Resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents 113

ECOLOGIZATION OF PRODUCTION

M. A. Shumilova, F. F. Chausov, D. K. Zhironov, K. A. Novozhilov On the possibility of tartaric acid and its salts application when disposing of waste copper plating electrolytes 123

M. S. Ivanova, K. O. Tomskii Purification of gas emissions of Srednebotuobinskoe oil-gas condensate field on a heterogeneous catalyst 134

A. M. Kuzmin, E. M. Gashevskiy Environmental and economic efficiency of small-scale methanol production based on syngas generators 144

REMEDIATION AND RECULTIVATION

T. Yu. Korshunova, L. A. Kulbaeva, E. V. Kuzina, M. G. Iskuzhina, G. F. Rafikova Model experiment to assess the effect of oil-destructor strain *Pseudomonas schmalbachii* N3.1 and remediant plants on the biological activity of soil contaminated with oil and herbicides 154

A. D. Moshkin, O. V. Ohlopkova, L. S. Adamenko, A. V. Glushkov, A. Yu. Alekseev, R. Abdinov, A. A. Gadzhiev, A. M. Shestopalov Aerobic hydrocarbon degradation in cold acidic soils: genomic profiling of hydrocarbon-degrading bacteria 164

AGROECOLOGY

A. A. Vypritskiy, A. A. Khovanskaya Forest reclamation assessment of the protection of agricultural lands in the dry steppe natural zone 173

ECOTOXICOLOGY

A. M. Sheromov, R. A. Lozhkina, A. S. Olkova Copper toxicity to *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894 under increased mineralization and high organic matter content 184

POPULATION ECOLOGY

L. V. Vesnina, D. M. Bezmaternykh, M. V. Lassyy, Yu. A. Vesnin *Artemia* spp. (Crustacea, Anostraca) productivity characteristics in lakes with different salinity in the southern Western Siberia 191

V. I. Ponomarev Ichthyofauna and fish population in the Koigorodsky National Park rivers 200

INFORMATION

E. A. Kryukova The Mendeleev Ecological Expedition brought together young researchers from 14 Russian cities 208

V. N. Simakov The city of Kirov is the core of the Kirov urban agglomeration: development directions 210

Потоки парниковых газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков: обзор

© 2026. Г. Д. Ватутин, аспирант, м. н. с.,

Е. А. Филимоненко, к. г.-м. н., в. н. с.,

Автономная некоммерческая образовательная организация
высшего образования «Научно-технологический университет Сириус»

354340, Россия, федеральная территория «Сириус»,

Олимпийский проспект, д. 1,

e-mail: georgyvautin@yandex.ru

Водно-болотные угодья играют важнейшую роль в глобальном углеродном цикле. Генерализация данных о потоках климатически активных газов – метана (CH_4), оксида азота(I) (N_2O) и углекислого газа (CO_2) из приморских водно-болотных угодий субтропической и тропической зоны выявила, что они являются их источниками со средними величинами эмиссии $187 \pm 19 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$; $7,6 \pm 1,0 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$; $0,13 \pm 0,05 \text{ мг N}_2\text{O}/\text{м}^2/\text{ч}$. Скорость эмиссии парниковых газов снижается с ростом солёности морских вод и смещением pH почв в области кислых или щелочных величин. В субтропических приморских водно-болотных угодьях снижение температуры почв и содержания в них органического вещества в зимний период уменьшают скорости эмиссии углекислого газа и метана. В тропической зоне высокая интенсивность эмиссии углекислого газа и оксида азота(I) наблюдается в засушливый период, а скорость эмиссии метана повышается в сезон дождей. Эмиссия углекислого газа и метана из прибрежных водно-болотных угодий, расположенных в тропическом муссонном типе климата, значительно выше в сравнении с аналогичными значениями для приморских водно-болотных экосистем, локализованных в постоянно влажном и сезонно-влажном типах климата. Среди приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков наибольшей скоростью эмиссии климатически активных газов характеризуются пресноводные марши и прибрежные болота.

Ключевые слова: климатически активные газы, водно-болотные угодья, тропики, субтропики.

Greenhouse gases fluxes from (sub)tropical blue carbon ecosystems: a review

© 2026. G. D. Vatutin ORCID: 0009-0004-7043-0054

E. A. Filimonenko ORCID: 0000-0002-8146-4514

Sirius University of Science and Technology,

1, Olympic Ave., Sirius Federal Territory, Russia, 354340,

e-mail: georgyvautin@yandex.ru

Blue carbon ecosystems are crucial for global carbon cycle. Fluxes of methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), and carbon dioxide (CO_2) from subtropical and tropical coastal wetlands revealed that these ecosystems act as net sources, with mean emission rates of $187 \pm 19 \text{ мг CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$, $7,6 \pm 1,0 \text{ мг CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$, and $0,13 \pm 0,05 \text{ мг N}_2\text{O}/\text{м}^2/\text{ч}$. Greenhouse gas emission rates decrease with increasing water salinity and soil pH shifts towards acidic or alkaline values. In subtropical coastal wetlands, lower both soil temperatures and organic matter content during the winter decrease emission rates of carbon dioxide and methane. In subtropical coastal wetlands lower both soil temperatures and organic matter content during the winter decrease emission rates of carbon dioxide and methane. In the tropical zone, high emission of carbon dioxide and nitrous oxide are observed during the dry season, whereas methane emissions peak during the wet season. Coastal wetlands located in tropical monsoon climates exhibit significantly higher carbon dioxide and methane emissions compared to those in tropical rainforest (constantly humid) and tropical savanna (seasonally humid) climate types. Among coastal wetland ecosystems in the tropics and subtropics, freshwater marshes and coastal swamps are characterized by the highest emission rates of climatically active gases.

Keywords: climate-active gases, coastal wetlands, tropics, subtropics.

Водно-болотные угодья играют критически важную роль в глобальных циклах углерода (C) и азота (N). Несмотря на то, что они занимают 5–8 % суши, данные экосистемы регулируют 68 % запасов C в почвах [1]. Основными типами водно-болотных угодий являются мангровые леса (14,5 млн га), марши (2,2 млн га), устья рек, прибрежные заболоченные земли и морские луга с коралловыми рифами (38,8 млн га).

Приморские водно-болотные экосистемы обладают высокой поглотительной способностью в отношении углерода и являются одними из наиболее эффективных его природных долгосрочных репозиторий. Поскольку прибрежные почвы в основном находятся под водой, то органическое вещество в них медленнее разлагается и не подвержено потерям в результате периодических пожаров, в отличие от наземных экосистем. Это способствует устойчивому накоплению и долгосрочному удержанию C в почвах приморских водно-болотных экосистем [2]. Прибрежные водно-болотные экосистемы являются репозиторием для 11,5 млрд т C, из которых 6,5 млрд т накоплено в мангровых экосистемах [3].

Скорость накопления C в прибрежных водно-болотных экосистемах составляет 138–226 г C/м² в год, что в 30–50 раз выше, чем в лесных экосистемах (4–5 г C/м² в год) [4, 5]. Среди всех типов приморских водно-болотных экосистем наибольшая скорость накопления C характерна для маршей – 242 ± 26 г C/м² в год, в мангровых лесах она составляет 168 ± 36 г C/м² в год, а в экосистемах морских лугов – 83 г C/м² в год [4]. Мангровые леса хранят 52 т N/га, из которых 96 % запасено на глубине до 1 м, что в 2,5 раза превышает запасы N в наземных экосистемах в сопоставимых климатических условиях [6].

Несмотря на высокую значимость водно-болотных угодий для глобального цикла C и N [1, 5], их площади сокращаются из-за чрезмерной эксплуатации их водных и биологических ресурсов [7]. Темпы ежегодного сокращения площадей водно-болотных угодий составляют 0,7–3,0 % для мангровых лесов, 1–2 % для маршей, 7 % для морских лугов [5]. Тропические водно-болотные угодья более уязвимы к антропогенному воздействию, чем водно-болотные экосистемы умеренной и бореальной зоны. Это обусловлено высокой антропогенной нагрузкой в тропиках и субтропиках из-за чрезмерной эксплуатации водных и биологических ресурсов ввиду большей экономической рентабельности по сравне-

нию с аналогичными экосистемами в других климатических зонах [7]. Ежегодно из деградировавших приморских водно-болотных экосистем выделяется до 1 млрд т CO₂, что составляет 20 % от глобальных выбросов в результате сведения лесов [8]. Потоки климатически активных газов (оксида углерода(IV) – CO₂, метана – CH₄, оксида азота(I) – N₂O) из водно-болотных угодий формируются в результате процессов молекулярной диффузии, пузырьковой эмиссии, а также в результате перемещения газов (метана) из донных отложений в атмосферу внутри тканей растений [9]. Однако газообмен в прибрежных водно-болотных угодьях субтропической и тропической зон изучен меньше, чем в аналогичных экосистемах умеренной зоны [10, 11]. Одним из основных научных вопросов в контексте климатических изменений является дискуссия о роли прибрежных водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков в глобальном потеплении – являются ли они источником или стоком климатически активных газов.

Целью данного обзора является генерализация имеющихся данных о величинах потоков климатически активных газов (CH₄, N₂O, CO₂) из приморских водно-болотных угодий субтропиков и тропиков в зависимости от физико-химических свойств почв и вод, экосистемных и климатических параметров.

Методы исследования

Сбор данных о потоках парниковых газов в водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков. База данных включала информацию о потоках парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O; мг/м²/ч), типе климата по Кёппену, координатах локаций исследований, типе экосистемы, среднегодовом количестве осадков, среднегодовой температуре воздуха. Дополнительными критериями, включёнными в базу данных, являлись pH, температура, плотность и влажность почв; содержание органического C и общего N в почвах; солёность и температура морских вод; температура атмосферного воздуха в момент измерений; глубина залегания подземных вод; доминирующий тип растительности в пределах территории исследования. Обзор величин потоков парниковых газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков выполнен на основе генерализации опубликованных научных данных в рецензируемых изданиях. Для поиска данных были использованы базы научных онлайн-библиотек Wiley ([Теоретическая и прикладная экология. 2026. № 3 / Theoretical and Applied Ecology. 2026. No. 3](https://on-</p>
</div>
<div data-bbox=)

linelibrary.wiley.com/), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), Springer Link (<https://link.springer.com/>), MDPI (<https://www.mdpi.com/>), Nature (<https://www.nature.com/>), Semantic Scholar (<https://www.semanticscholar.org/>), ResearchGate (<https://www.researchgate.net/>), JSTOR (<https://www.jstor.org/>), Copernicus (<https://bg.copernicus.org/>), Frontiers (<https://www.frontiersin.org/>), Taylor & Francis online (<https://www.tandfonline.com/>), Inter-Research Science Publisher (<https://www.int-res.com/>). Формула поиска публикаций включала ключевые словосочетания: coastal wetland OR methane flux, tropical coastal wetland OR methane flux, carbon dioxide flux AND coastal ecosystems, carbon dioxide flux AND tropical coastal ecosystems, methane flux AND coastal ecosystems, methane flux AND tropical coastal ecosystems, nitrous oxide AND coastal ecosystems, nitrous oxide AND tropical coastal ecosystems. В результате поиска количество найденных значений (n) потоков CO₂, CH₄ и N₂O составило 583, 483 и 156 соответственно. Сформированная база данных охватывает все субтропические и тропические регионы мира (Юго-Восточная Азия, Палау и Папуа-Новая Гвинея; Австралия и Новая Каледония; Восточная Азия; юго-восточные штаты США; Карибский бассейн; Бразилия; Африка: Танзания, Кения, Кот'д-Ивуар и остров Реюньон) (рис. 1).

Наиболее часто встречающиеся типы прибрежных водно-болотных экосистем для каждого региона, включённого в настоящий обзор, представлены в таблице.

Обработка результатов. Обработка численных значений потоков климатически активных газов, включённых в базу данных, проводилась в программном обеспечении MS Excel. Группировка собранных данных была выполнена по ряду критериев: регион исследования, тип прибрежной водно-болотной экосистемы, тип климата по Кёппену, сезон проведения замеров потоков газов, pH почв, солёность прибрежных вод. Для оценки средних величин потоков парниковых газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков были подсчитаны и учтены: их средние арифметические и медианные значения, стандартное отклонение и стандартная ошибка среднего. Для измерения статистической значимости различий между группами использовался критерий Тьюки (средневзвешенное среднее значение) однофакторного дисперсионного анализа (One-Way ANOVA) при доверительном интервале в 95% ($p < 0,05$).

Результаты и обсуждение

Генерализация данных о потоках климатически активных газов в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков показала, что потоки углекислого газа из почв изменяются в диапазоне от -1758 до 3555 мг CO₂/м²/ч; метана – от -28,5 мг CH₄/м²/ч до 245 мг CH₄/м²/ч; оксида азота(I) – от -2,74 мг N₂O/м²/ч до 7,18 мг N₂O/м²/ч. Водно-болотные угодья тропиков и субтропиков являются эмитентом углекислого газа в 80 %

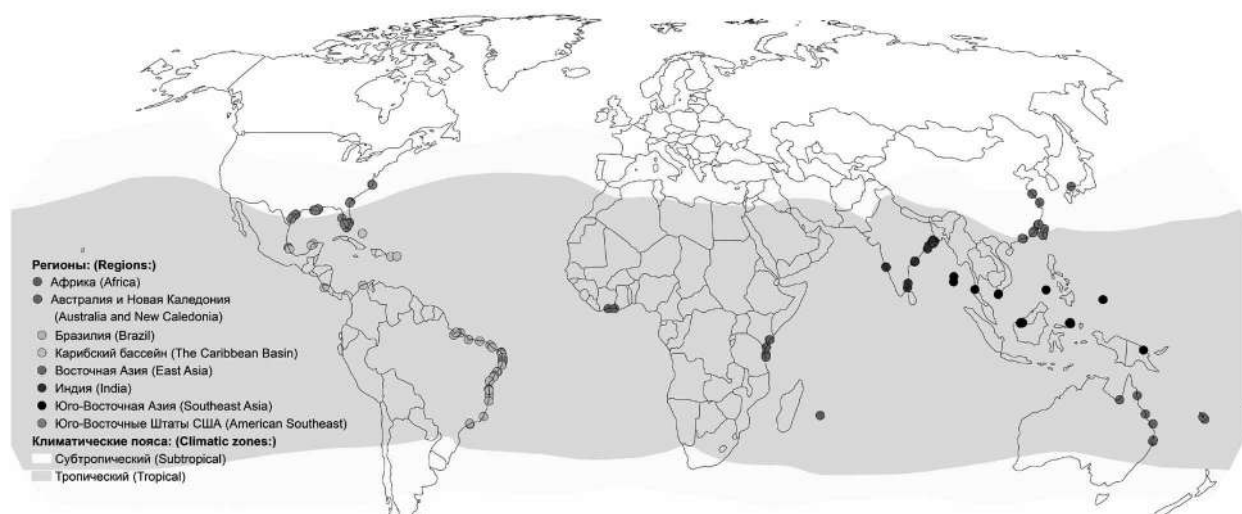


Рис. 1. Карта расположения приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков, включённых в базу данных для оценки потоков углекислого газа, метана и оксида азота(I)

Fig. 1. Map of the blue carbon ecosystems in the tropics and subtropics included in the database for assessing carbon dioxide, methane, and nitrous oxide fluxes

Таблица / Table

Частотные характеристики данных потоков углекислого газа, метана и оксида азота (I)
для разных типов приморских водно-болотных угодий субтропической и тропической зоны
Frequency distribution of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide
fluxes across blue carbon ecosystems in subtropics and tropics

Регион мира / Region	Типы прибрежных водно-болотных экосистем Types of coastal ecosystems
Страны Юго-Восточной Азии Southeast Asia	мангровые леса / mangrove forests (n = 58), устья рек / river estuaries (n = 36), мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 16)
Австралия и Новая Каледония Australia and New Caledonia	мангровые леса / mangrove forests (n = 45), коралловые рифы / coral reefs (n = 45), мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 24)
Восточная Азия East Asia	солоноватые марши / brackish marshes (n = 75), мангровые леса / mangrove forests (n = 65), устья рек / river estuaries (n = 25)
Индия India	мангровые леса / mangrove forests (n = 86), мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 78)
Юго-восточные штаты США American Southeast	устья рек / river estuaries (n = 91), болота и заболоченные леса / swamps and swamp forests (n = 78), пресноводные (n = 51) и солоноватые марши / freshwater and brackish marshes (n = 41)
Страны Карибского бассейна The Caribbean Basin countries	пресноводные марши / freshwater marshes (n = 36), мангровые леса / mangrove forests (n = 25), болота и заболоченные леса / swamps and swamp forests (n = 23)
Африка и Реюньон Africa and Réunion	мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 42), устья рек / river estuaries (n = 30), прибрежные тропические леса / tropical flooded forests (n = 27)
Бразилия Brazil	мангровые ручьи / mangrove creeks (n = 68), коралловые рифы / coral reefs (n = 33), прибрежные тропические леса / tropical flooded forests (n = 15)

Примечание: n – количество значений потоков климатически активных газов (CO_2 , CH_4 , N_2O), включённых в базу данных.

Note: n is a quantity of greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O) fluxes values, included in a database.

случаев, метана – в 90 %, оксида азота(I) – в 87 %. Средняя интенсивность потоков углекислого газа составляет $186,5 \pm 18,7$ мг CO_2 /м²/ч; метана – $7,64 \pm 1,03$ мг CH_4 /м²/ч; оксида азота(I) – $0,13 \pm 0,05$ мг N_2O /м²/ч.

Экосистемы пресноводных маршей характеризуются самой высокой скоростью эмиссии углекислого газа и метана среди всех рассматриваемых экосистем в зоне тропиков и субтропиков (рис. 2).

Потоки углекислого газа из мангровых лесов, мангровых ручьёв и устьев рек в 2–6 раза ниже по сравнению с маршевыми и прибрежно-лесными экосистемами, что свидетельствует о более эффективном накоплении и стабилизации углерода в манграх. В коралловых рифах наблюдается депонирование углекислого газа, а также низкие скорости эмиссии метана и оксида азота(I) в сравнении с другими приморскими водно-болотными экосистемами (рис. 2). В сезонно затапливаемых прибрежных тропических водно-болотных угодьях, к которым относятся

пресноводные и солоноватые марши, происходит более интенсивная эмиссия метана (рис. 2), чем в постоянно затопленных водно-болотных экосистемах [12]. В заболоченных и мангровых лесах эмиссия CH_4 в 1,9–3,7 раза ниже, чем в маршах, а приливные тропические леса являются стоком метана. Экосистемы прибрежных болот и заболоченных лесов формируют поток оксида азота(I) в $0,46 \pm 0,45$ мг N_2O /м²/ч (рис. 2). Это значение является наивысшим среди всех прибрежных водно-болотных экосистем. Пресноводные марши, мангровые и приливные тропические леса характеризуются меньшей скоростью эмиссии N_2O в сравнении с прибрежными болотистыми экосистемами. Небольшая интенсивность эмиссии оксида азота(I) относительно других приморских водно-болотных экосистем характерна для солоноватых маршей, устьев рек и коралловых рифов.

Приморские водно-болотные угодья, расположенные в регионе Карибского бассейна и в юго-восточных штатах США, представлен-

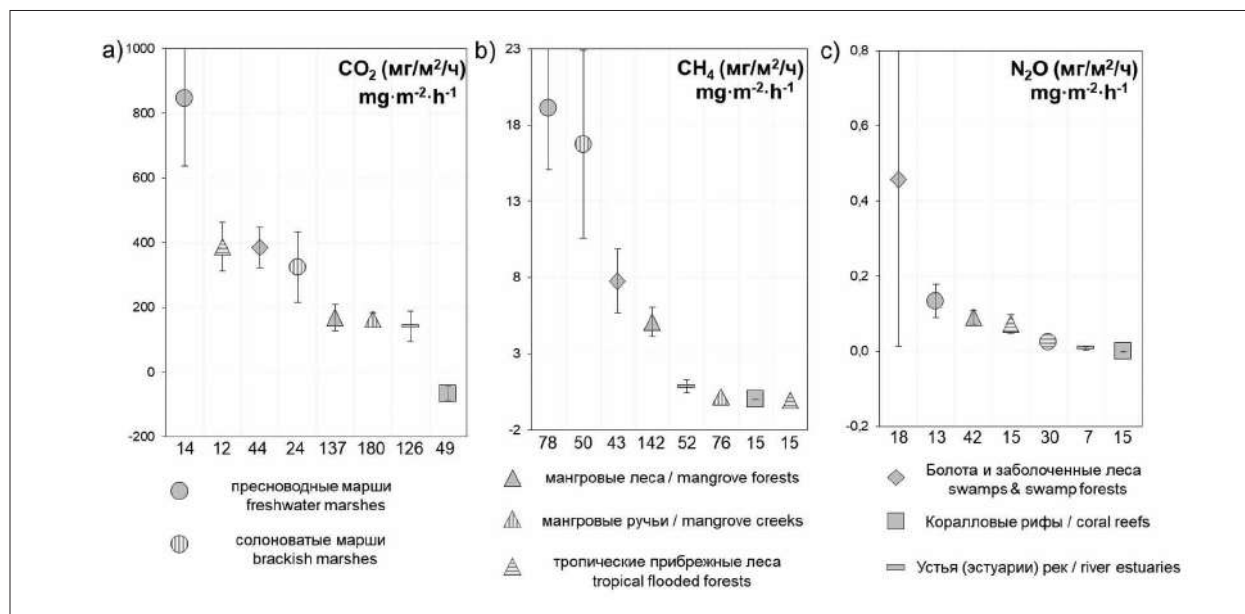


Рис. 2. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота(I) (c) в зависимости от типа приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков. Здесь и далее на рисунках: цифрами на горизонтальной оси обозначено количество значений, учтённых для расчёта среднего; планками погрешностей изображены стандартные ошибки среднего
Fig. 2. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide across coastal wetland ecosystems in the tropics and subtropics. Here and further in the figures: numbers on the horizontal axis indicate the sample size used to calculate the mean; error bars represent the standard error of the mean

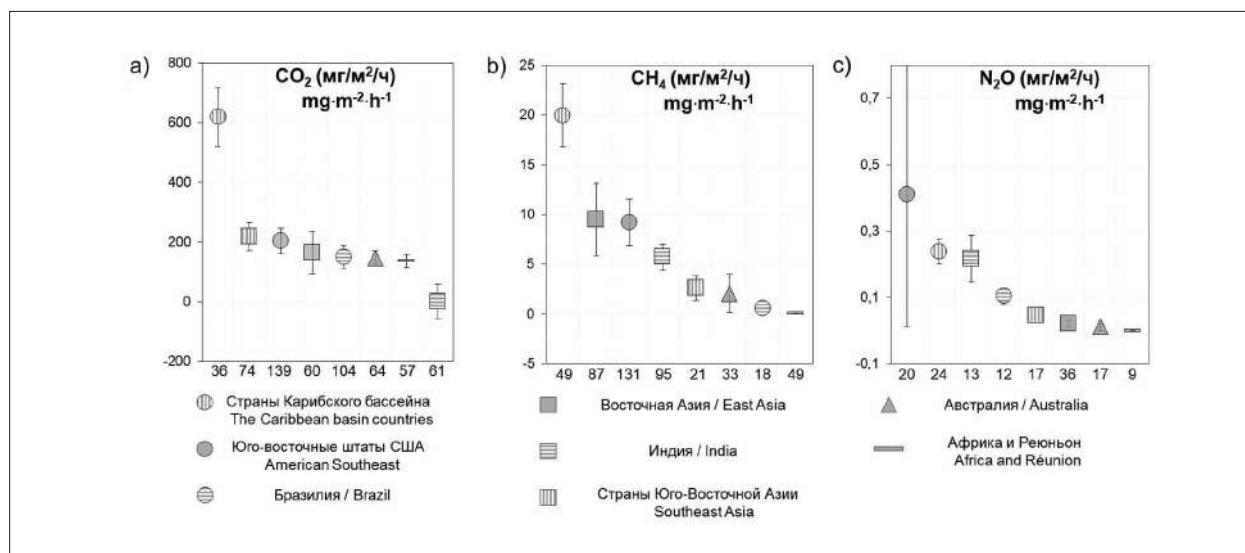


Рис. 3. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота(I) (c) в зависимости от региона локализации тропических и субтропических водно-болотных экосистем
Fig. 3. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane and (c) nitrous oxide by region of tropical and subtropical wetland ecosystems

ные в основном пресноводными маршами, мангровыми лесами и заболоченными зонами, характеризуются высокими значениями интенсивности эмиссии парниковых газов относительно экосистем, расположенных в других тропических и субтропических регионах мира. Для прибрежных водно-болотных экосистем, расположенных в Африке, характерны низкие скорости эмиссии парниковых газов в сравне-

нии с экосистемами других субтропических и тропических регионов (рис. 3).

В прибрежных водно-болотных экосистемах, расположенных в юго-восточных штатах США зафиксирован высокий разброс индивидуальных значений потоков оксида азота(I) из прибрежных почв (от -2,74 до 7,18 мг N₂O/м²/ч). В среднем приморские водно-болотные угодья в этом регионе эми-

тируют оксид азота (I) со скоростью в $0,41 \pm 0,40$ мг N_2O /м²/ч. Этот показатель на 70–90 % превышает аналогичные значения для экосистем Карибского и Индийского регионов. Для прибрежных водно-болотных угодий Бразильского региона средний показатель интенсивности эмиссии оксида азота (I) в 2–4 раза ниже, чем в приморских экосистемах юго-востока США, в Индии и в Карибском регионе. При этом скорость эмиссии N_2O для приморских водно-болотных экосистем Бразилии в 2–10 раз выше, чем в прибрежных водно-болотных экосистемах Юго-Восточной Азии, Восточной Азии и Австралии. Приморские водно-болотные экосистемы, расположенные в Африканском регионе, являются стоком оксида азота (I).

Установлена сезонная изменчивость скорости эмиссии парниковых газов, а также её зависимость от типа климата в прибрежных водно-болотных экосистемах. Кроме этого, на интенсивность эмиссии климатически активных газов из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков влияют солёность прибрежных вод и pH почв.

Влияние физико-химических свойств воды на потоки парниковых газов из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков.

Генерализация глобальных данных о потоках углекислого газа, метана и закиси азота в приморских водно-болотных экосистемах субтропической и тропической зоны в зависимости от солёности вод была произведена на основе Венецианской классификации [13]. Наиболее интенсивная эмиссия угле-

кислого газа, метана и оксида азота (I) (рис. 4) происходит из пресноводных приморских водно-болотных экосистем – 342 ± 53 мг CO_2 /м²/ч; $13,7 \pm 2,7$ мг CH_4 /м²/ч; $0,13 \pm 0,04$ мг N_2O /м²/ч).

В годовом цикле показатель солёности прибрежных вод достигает максимума в сухой сезон в тропической зоне, и в летний период – в субтропиках. Это связано с повышенной испаряемостью прибрежных вод и меньшим относительно испаряемости воды количеством осадков. Общим следствием повышения солёности прибрежных вод является снижение интенсивности эмиссии CO_2 , CH_4 и N_2O . Это обусловлено снижением скорости микробного метаболизма из-за возрастания энергетических затрат микроорганизмов на адаптацию к среде с высоким содержанием солей в воде [14, 15]. Кроме этого, в условиях высокой солёности вод углекислый газ, выделяющийся в результате микробной деятельности, растворяется и интенсивнее осаждается в виде карбоната кальция ($CaCO_3$), чем в пресноводных условиях [16], что уменьшает итоговую эмиссию CO_2 из водно-болотных экосистем с повышенной солёностью вод.

С увеличением солёности прибрежных вод, количество сульфатредуцирующих бактерий, основных ингибиторов метаногенеза, повышается за счёт вытеснения метаногенов сульфатвосстанавливающими бактериями [17]. Это приводит к снижению интенсивности выделения CH_4 в прибрежных водах с высокой солёностью (рис. 4).

Снижение потоков оксида азота (I) из водно-болотных экосистем тропиков и суб-

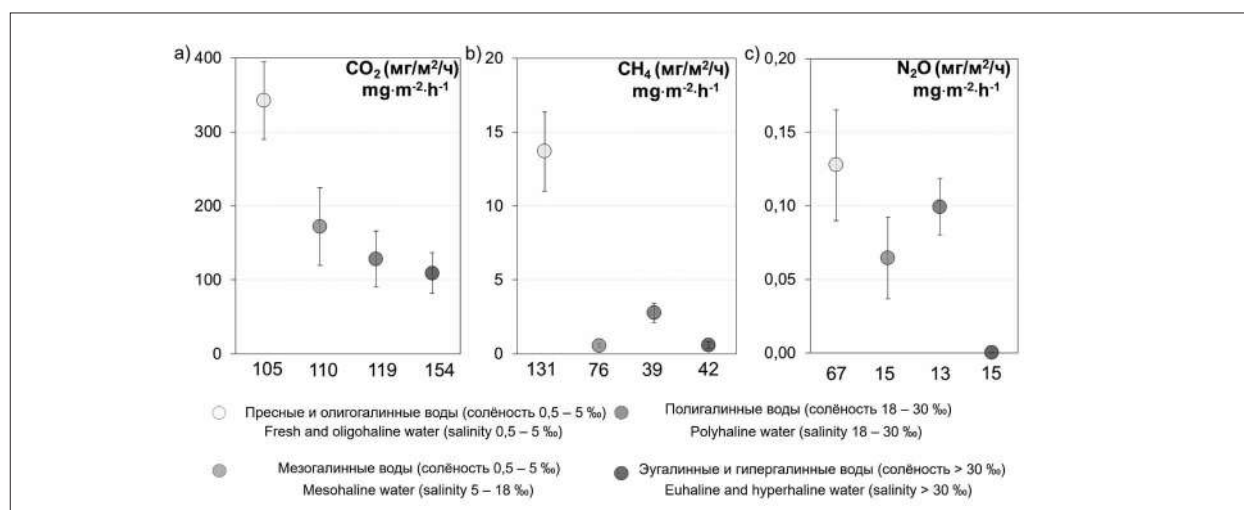


Рис. 4. Потоки углекислого газа (а), метана (б) и оксида азота (I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков в зависимости от их солёности

Fig. 4. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical and subtropical coastal wetlands depending on water salinity

тропиков при повышении солёности прибрежных вод (рис. 4) связано с подавлением активности нитрифицирующих и денитрифицирующих бактерий [18, 19]. В дождливый сезон в тропической зоне, и в зимний период – в субтропиках, солёность прибрежных вод достигает минимальных значений в годовом цикле этого показателя. В течение этих периодов испарение воды в результате воздействия солнечных лучей максимально снижается, в то время как количество осадков либо повышается (как в тропиках), либо остаётся на таком же уровне, как и в летний период (для субтропиков). Обратный процесс – снижение солёности прибрежных вод – будет приводить к росту эмиссии климатически активных газов из тропических и субтропических водно-болотных экосистем.

Для генерализации глобальных данных об интенсивности потоков климатически активных газов в приморских водно-болотных экосистемах субтропиков и тропиков в зависимости от pH почв, данные были сгруппированы в соответствии со шкалой pH NRCS USDA [20] следующим образом: pH от 4 до 6,4 (кислые почвы), pH от 6,6 до 7,3 (нейтральные почвы), pH от 7,3 до 8,5 (щелочные почвы).

Приморские водно-болотные угодья с нейтральным pH почв характеризуются более интенсивными потоками метана и оксида азота(I) (рис. 5) в атмосферу по сравнению с кислыми и щелочными почвами.

В кислых почвах происходит деактивация ферментов, участвующих в метаногенезе (ацетаткиназы, формилметанофурандегидрогеназы, тетрагидрометанооптерин-S-метилтрансферазы), а также накопление

летучих жирных кислот, которые ингибируют процесс метаногенеза [21]. При наличии большого количества живой и мёртвой наземной биомассы и при оптимальных для анаэробного разложения органического вещества условиях (прилив) интенсивность эмиссии метана из приливно-отливных прибрежных водно-болотных угодий может резко возрасти до 91–245 мг $\text{CH}_4/\text{м}^2/\text{ч}$ даже в слабокислой (pH 6,2) почве [22]. С повышением pH почв токсичность аммиака для метаногенных бактерий возрастает [23], хотя известны метаногенные микроорганизмы, способные к адаптации при высоких показателях pH почв [24].

Снижение скорости эмиссии оксида азота(I) из кислых почв приморских водно-болотных угодий связано с замедлением скорости нитрификации и, одновременно с этим, ингибированием активности фермента N_2O -редуктазы, который отвечает за финальный этап бактериальной денитрификации в почвах [25, 26]. Ингибиторы нитрификации (ацетилен) на 77 % эффективнее снижают эмиссию оксида азота(I) в щелочных почвах, в сравнении с кислыми и нейтральными почвами, в которых снижение составляет 55 и 51 %, соответственно [27]. В щелочных почвах снижается доступность субстрата для денитрификации, а также подавляется активность генов-денитрификаторов *nirK*, *nirS* и *nosZ*, что приводит к снижению интенсивности этого процесса [28].

При смещении pH в область щелочных значений скорость эмиссии углекислого газа из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков уменьшается (рис. 5).

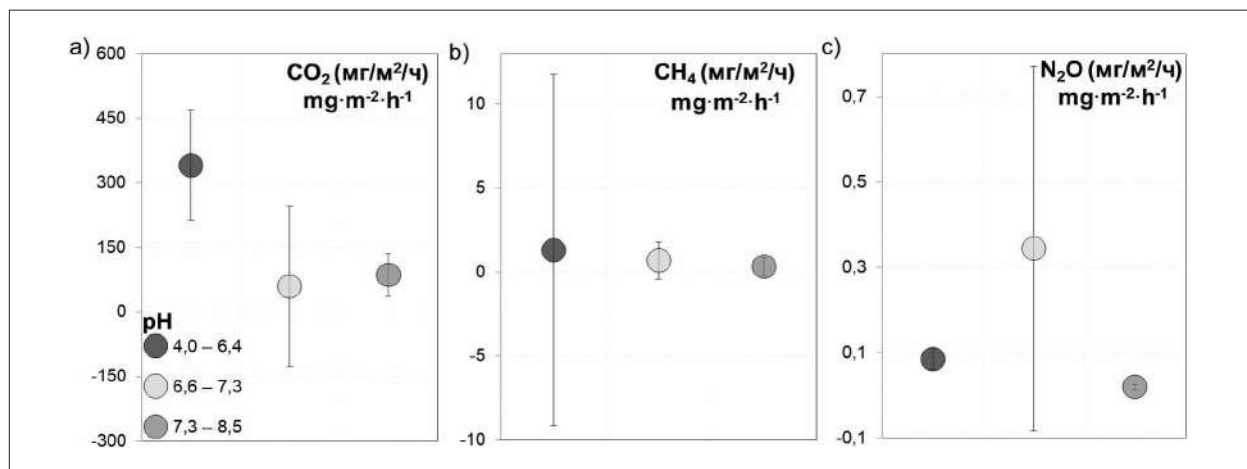


Рис. 5. Потоки углекислого газа (а), метана (б) и оксида азота(I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропиков и субтропиков в зависимости от pH почвы
Fig. 5. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical and subtropical coastal wetlands depending on soil pH

При более низких значениях pH почв парциальное давление CO_2 в почвах резко возрастает, что потенциально приводит к большему поступлению CO_2 из почв в атмосферу [29]. Под влиянием приливов в литоральной зоне происходит обмен веществами между почвой и водой, в результате чего в почву поступают катионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), снижающие кислотность почв, и интенсивность эмиссии углекислого газа снижается. В щелочных почвах приморских водно-болотных угодий усиливается поглощение CO_2 при образовании гидрокарбоната кальция в результате реакции между карбонатом и CO_2 [30, 31], что приводит к снижению потоков углекислого газа.

Влияние времени года на потоки парниковых газов из приморских водно-болотных экосистем тропиков и субтропиков. В почвах субтропических водно-болотных угодий температурные колебания являются значимым фактором интенсивности почвенного дыхания [32, 33]. Для субтропических экосистем характерно четыре периода года: жаркое дождливое лето, переходные периоды (осень, весна) и мягкая зима с малым количеством осадков (кроме мест, где осадки распределены равномерно в течение всего года). Наибольшие потоки углекислого газа и метана наблюдаются в весенний и летний периоды, которые характеризуются высокой температурой ($25,5^\circ\text{C}$ – весна; $30,9^\circ\text{C}$ – лето) и влажностью (35,6; 36,2 %) почв (рис. 6).

В летнее время в водно-болотные экосистемы субтропической зоны поступает больше органических остатков, чем в остальное время года, что усиливает интенсивность

эмиссии климатически активных газов [34]. Совокупный эффект истощения лабильного и легко минерализуемого органического вещества и более низких зимних температур снижает скорость эмиссии углекислого газа и метана в зимний сезон [35].

В тропических приморских водно-болотных экосистемах годовая амплитуда температур почв незначительная – $3\text{--}5^\circ\text{C}$. В тропиках преобладают два сезона: дождливый и сухой. Влажность является наиболее важным фактором сезонной динамики эмиссии парниковых газов из почв в тропических широтах. Во влажный сезон скорость эмиссии CO_2 из тропических приморских водно-болотных угодий на 20 % ниже, чем во время засушливого сезона (рис. 7).

В засушливый период доступность кислорода в почвах повышается, что является благоприятным фактором для аэробного окисления органического вещества в почвах прибрежных водно-болотных экосистем [36, 37]. Следовательно, в сухой сезон в почвах прибрежных водно-болотных угодий тропической зоны наблюдается более интенсивная эмиссия CO_2 в атмосферу, в то время как в дождливый сезон доступность почвенного кислорода снижается из-за высокой влажности почв и заполнения почвенных пор водой. Это приводит к снижению активности процессов аэробного разложения органического вещества и понижению интенсивности эмиссии CO_2 в атмосферу [38].

Потоки метана из прибрежных водно-болотных угодий тропической зоны во время влажного сезона в 4,5 раза ($p < 0,05$) выше, чем во время сухого сезона (рис. 7). Во влаж-

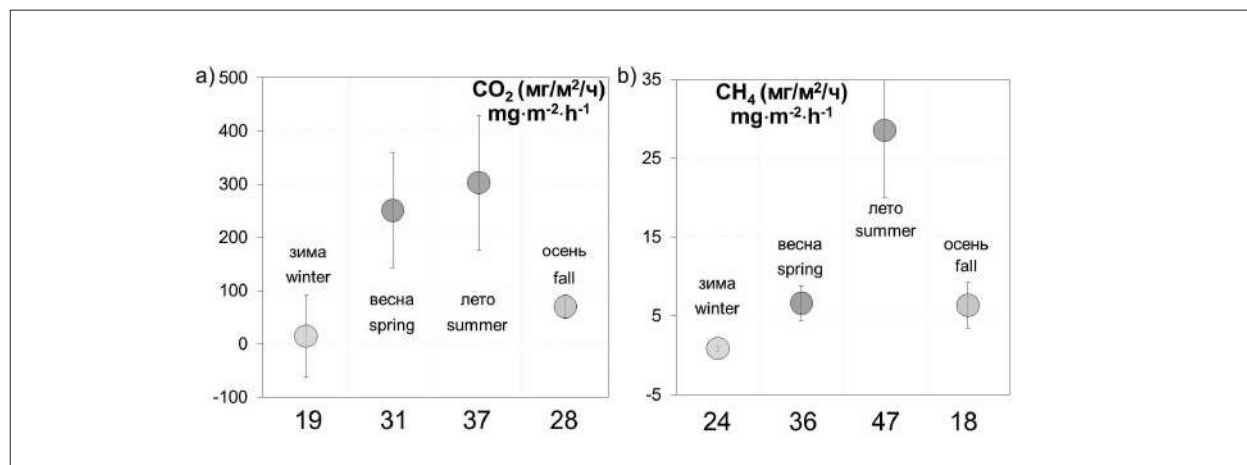


Рис. 6. Потоки углекислого газа (а) и метана (б) в приморских водно-болотных экосистемах субтропиков в зависимости от сезона года / Fig. 6. Fluxes of (a) carbon dioxide and (b) methane in subtropical coastal wetlands depending on season

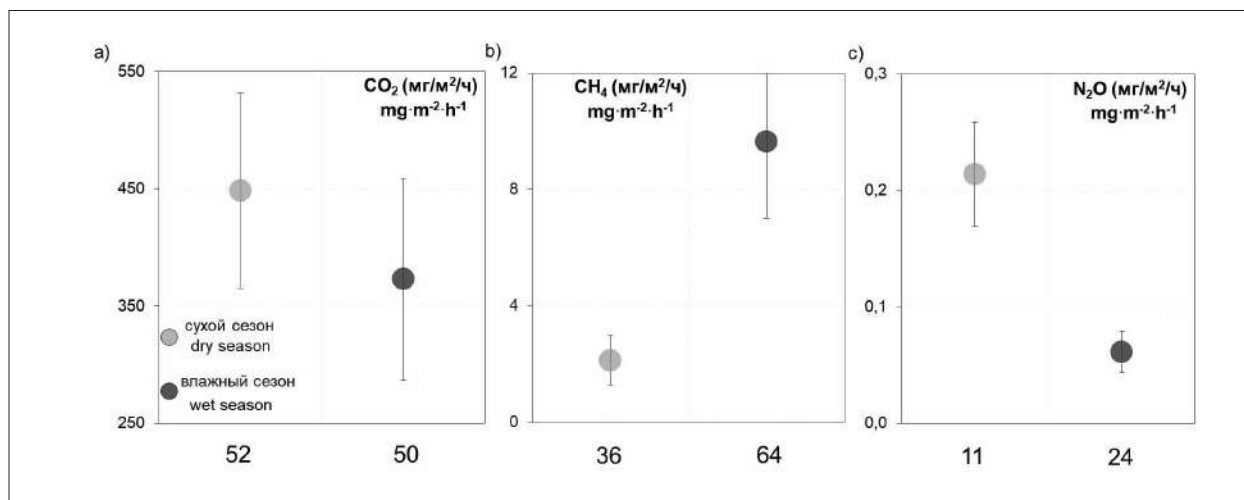


Рис. 7. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота(I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропиков в сухой и влажный сезоны
Fig. 7. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical coastal wetlands during the dry and wet seasons

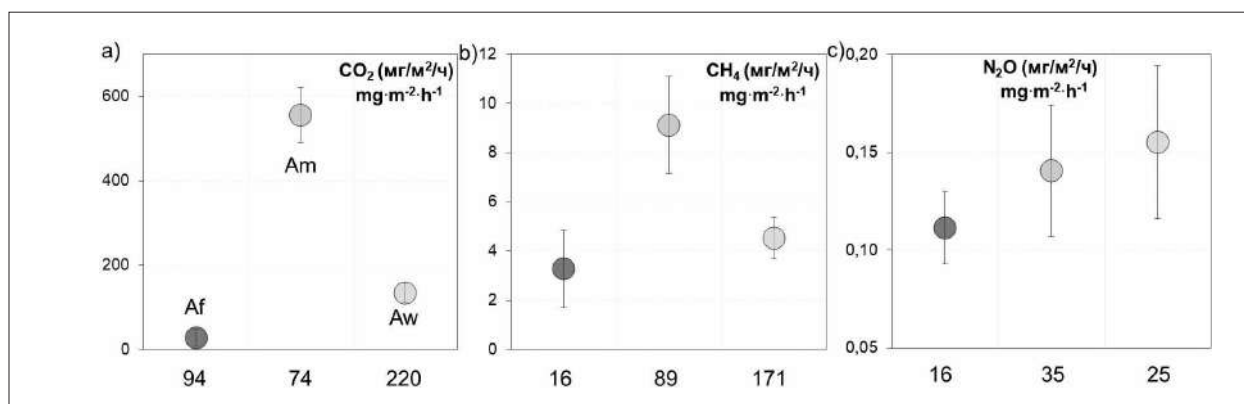


Рис. 8. Потоки углекислого газа (а), метана (b) и оксида азота(I) (с) в приморских водно-болотных экосистемах тропического муссонного (Af), экстремально влажного (Am) и более засушливого (Aw) климата
Fig. 8. Fluxes of (a) carbon dioxide, (b) methane, and (c) nitrous oxide in tropical coastal wetlands under monsoon-influenced (Am), tropical rainforest (Af), and tropical savanna (Aw) climates

ный сезон почвы приморской зоны затопляются, происходит снижение окислительно-восстановительного потенциала (до 100), сочетающееся со снижением солёности вод, и увеличением содержания органического вещества, что способствует усилению метаногенеза [22, 36, 39] и усиливает его эмиссию.

Потоки оксида азота(I) из прибрежных водно-болотных угодий тропической зоны во время влажного сезона в 3,5 раза ниже, чем во время сухого (рис. 7). Во влажных бескислородных условиях при активной денитрификации и анаэробном окислении аммония, из почв активно выделяется молекулярный азот, что снижает интенсивность выбросов оксида азота(I) [34].

Прибрежные водно-болотные экосистемы, расположенные в зоне тропического мус-

сонного климата, характеризуются высокой скоростью эмиссии углекислого газа и метана (рис. 8).

В экстремально влажных (Af) или более засушливых (Aw) условиях скорости эмиссии CO_2 и CH_4 снижены в сравнении с приморскими водно-болотными угодьями в тропическом муссонном климате. С уменьшением количества среднегодовых осадков в тропиках интенсивность эмиссии оксида азота(I) (рис. 8) постепенно возрастает. Для водно-болотных угодий, расположенных в зоне постоянно влажного климата (Af), среднегодовое количество осадков составляет в среднем 2460 мм, средняя скорость эмиссии N_2O на 26 % меньше по сравнению с экосистемами в муссонном климате (Am), среднегодовое количество осадков составляет в среднем 1955 мм).

Закключение

На основании 1222 индивидуальных значений потоков CO_2 , CH_4 , N_2O из приморских водно-болотных угодий в тропиках и субтропиках была выполнена их генерализация для оценки средних величин и установления зависимости от солёности прибрежных вод, водородного показателя почв, сезонности, а также региона исследования и типа экосистем. Скорость эмиссии CO_2 , CH_4 , N_2O из почв приморских водно-болотных угодий субтропиков и тропиков снижается с повышением солёности шельфовых вод. Это связано с осмотическим стрессом для микробного сообщества и ингибированием микробного дыхания почв. Потоки метана и оксида азота (I) из почв приморских водно-болотных угодий субтропиков и тропиков имеют наибольшую скорость при нейтральном pH почв, которая снижается при смещении водородного показателя в области более кислых или щелочных значений. С наступлением влажного сезона в тропических приморских водно-болотных экосистемах эмиссия метана значительно увеличивается в сравнении с сухим сезоном. Интенсивность потоков оксида азота (I) и углекислого газа в прибрежных водно-болотных угодьях субтропиков и тропиков снижается с наступлением дождливого периода. Потоки CO_2 и CH_4 из приморских водно-болотных угодий субтропической и тропической зоны имеют наибольшие величины в пресноводных маршах, а N_2O – в прибрежных заболоченных лесах. Коралловые рифы являются стоком углекислого газа, а приливные тропические леса – поглотителем метана из атмосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус» (Соглашение №18-03 от 10.09.2024).

References

1. Kumar A., Thakur T.K., Yu Z.G. Editorial: Wetland ecosystems as important greenhouse hotspots // Front. Environ. Sci. 2023. V. 10. Article No. 1127269. doi: 10.3389/fenvs.2022.1127269
2. Howard J., Sutton-Grier A., Herr D., Kleypas J., Landis E., Mcleod E., Pidgeon E., Simpson S. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation // Front. Ecol. Environ. 2017. V. 15. No. 1. P. 42–50. doi: 10.1002/fee.1451
3. Choudhary B., Dhar V., Pawase A.S. Blue carbon and the role of mangroves in carbon sequestration: its

mechanisms, estimation, human impacts and conservation strategies for economic incentives // J. Sea Res. 2024. V. 199. No. 9. Article No. 102504. doi: 10.1016/j.seares.2024.102504

4. Dutta J., Zaman S., Mitra A. Blue carbon: a natural prescription to mitigate Global Climate Change // Climate Change and blue carbon: webinar articles on “Blue carbon domain: a potential regulator of Climate Change” under RUSA 2.0. Centre of excellence environment, Climate Change and public health, Utkal University, 2020. P. 74–80.
5. Mcleod E., Chmura G.L., Bouillon S., Salm R., Björk M., Duarte C.M., Loverock C.E., Schlesinger W.H., Silliman B.R. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 // Front. Ecol. Environ. 2011. V. 9. No. 10. P. 552–560. doi: 10.1890/110004
6. Alongi D.M. Nitrogen cycling and mass balance in the world’s mangrove forests // Nitrogen. 2020. V. 1. No. 2. P. 167–189. doi: 10.3390/nitrogen1020014
7. Bernal B., Mitsch W.J. Carbon sequestration in freshwater wetlands in Costa Rica and Botswana // Biogeochemistry. 2013. V. 115. P. 77–93. doi: 10.1007/s10533-012-9819-8
8. Fennessy S., Beers L. The contribution of blue carbon ecosystems to climate change mitigation. Ramsar Briefing Note 12. 2023 [Internet resource] https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn12_blue_carbon_ccmitigation_e.pdf (Accessed: 15.08.2025). doi: 10.13140/RG.2.2.17891.22565
9. Malerba M.E., Friess D.A., Peacock M., Grinham A., Taillardat P., Rosentreter J.A., Webb J., Iram N., Al-Haj A.N., Macreadie P.I. Methane and nitrous oxide emissions complicate the climate benefits of teal and blue carbon wetlands // One Earth. 2022. V. 5. No. 12. P. 1336–1341. doi: 10.1016/j.oneear.2022.11.003.
10. Marín-Muñiz J.L., Hernández M.E., Moreno-Casasola P. Comparing soil carbon sequestration in coastal freshwater wetlands with various geomorphic features and plant communities in Veracruz, Mexico // Plant Soil. 2014. V. 378. No. 1–2. P. 189–203. doi: 10.1007/s11104-013-2011-7
11. Moyo S. Carbon sequestration and fluxes // Fundamentals of tropical freshwater wetlands / Eds. T. Dalu, R.J. Wasserman. Elsevier, 2022. P. 111–131. doi: 10.1016/B978-0-12-822362-8.00016-5
12. Nahlik A.M., Mitsch W.J. Methane emissions from tropical freshwater wetlands located in different climatic zones of Costa Rica // Global Change Biol. 2011. V. 17. No. 3. P. 1321–1334. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02190.x
13. Ito T. The Venice system for the classification of marine waters according to salinity: symposium on the classification of brackish waters, Venice, 8–14 April 1958 // Jpn. J. Limnol. 1959. V. 20. No. 3. P. 119–120 (in Japanese). doi: 10.3739/rikusui.20.119
14. Chambers L.G., Osborne T.Z., Reddy K.R. Effect of salinity-altering pulsing events on soil organic carbon loss along an intertidal wetland gradient: a laboratory experiment // Biogeochemistry. 2013. V. 115. No. 1–3. P. 363–383. doi: 10.1007/s10533-013-9841-5

15. Nie M.H., Liu M., Hou L.J., Lin X., Li Y., Yan C.X., Yang Y. Seasonal variation of soil respiration and its influence factors in tidal flat of Yangtze Estuary // *Acta Scientiae Circumstantiae*. 2011. V. 31. No. 4. P. 824–831.
16. Howard J.L., Creed J.C., Aguiar M.V.P., Fourqurean J.W. CO₂ released by carbonate sediment production in some coastal areas may offset the benefits of seagrass “Blue Carbon” storage // *Limnol. Oceanogr.* 2018. V. 63. No. 1. P. 160–172. doi: 10.1002/lno.10621
17. Murguia-Flores F., Jaramillo V.J., Gallego-Sala A. Assessing methane emissions from tropical wetlands: Uncertainties from natural variability and drivers at the global scale // *Global Biogeochem. Cycles*. 2023. V. 37. No. 9. Article No. e2022GB007601. doi: 10.1029/2022GB007601
18. Neubauer S.C., Piehler M.F., Smyth A.R., Franklin R.B. Saltwater intrusion modifies microbial community structure and decreases denitrification in tidal freshwater marshes // *Ecosystems*. 2019. V. 22. P. 912–928. doi: 10.1007/s10021-018-0312-7
19. Navada S., Vadstein O. Salinity acclimation strategies in nitrifying bioreactors // *Front. Mar. Sci.* 2022. V. 9. Article No. 867592. doi: 10.3389/fmars.2022.867592
20. Examination and description of soil profiles // *Soil Survey Manual*. 2017 [Internet resource] <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/SSM-ch3.pdf> (Accessed: 03.02.2026).
21. Qiu S., Zhang X., Xia W., Li Z., Wang L., Chen Z., Ge S. Effect of extreme pH conditions on methanogenesis: methanogen metabolism and community structure // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 877. Article No. 162702. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.162702
22. Hirota M., Senga Y., Seike Y., Nohara S., Kunii H. Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan // *Chemosphere*. 2007. V. 68. No. 3. P. 597–603. doi: 10.1016/j.chemosphere.2007.01.002
23. Sprott G.D., Patel G.B. Ammonia toxicity in pure cultures of methanogenic bacteria // *Syst. Appl. Microbiol.* 1986. V. 7. No. 2–3. P. 358–363. doi: 10.1016/S0723-2020(86)80034-0
24. Zhilina T.N., Zavarzin G.A. Alkaliphilic anaerobic community at pH 10 // *Curr. Microbiol.* 1994. V. 29. No. 2. P. 109–112. doi: 10.1007/BF01575757
25. Sim A.K.F., Ishak C.F., Hanif A.H.M., Melling L. Effect of N fertilization on N₂O emission from a tropical peat soil: a laboratory incubation study // *Peatlands in Balance: proceedings of the 14th International Peat Congress*. Stockholm, 2012. P. 3–8.
26. Thomsen J.K., Geest T., Cox R.P. Mass spectrometric studies of the effect of pH on the accumulation of intermediates in denitrification by *Paracoccus denitrificans* // *Appl. Environ. Microbiol.* 1994. V. 60. No. 2. P. 536–541. doi: 10.1128/AEM.60.2.536-541.1994
27. Lei J., Fan Q., Yu J., Ma Y., Yin J., Liu R. A meta-analysis to examine whether nitrification inhibitors work through selectively inhibiting ammonia-oxidizing bacteria // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. Article No. 962146. doi: 10.3389/fmicb.2022.962146
28. Pan Y., She D., Shi Z., Cao T., Xia Y., Shan J. Salinity and high pH reduce denitrification rates by inhibiting denitrifying gene abundance in a saline-alkali soil // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. No. 2155. Article No. 2155. doi: 10.1038/s41598-023-29311-7
29. Hu M., Ren H., Ren P., Li J., Wilson B.J., Tong C. Response of gaseous carbon emissions to low-level salinity increase in tidal marsh ecosystem of the Min River estuary, southeastern China // *J. Environ. Sci.* 2017. V. 52. P. 210–222. doi: 10.1016/j.jes.2016.05.009
30. Ma J., Wang Z.Y., Stevenson B.A., Zheng X.J., Li Y. An inorganic CO₂ diffusion and dissolution process explains negative CO₂ fluxes in saline/alkaline soils // *Sci. Rep.* 2013. V. 3. No. 1. Article No. 2055. doi: 10.1038/srep02025
31. Wang X., Jiang Z., Li Y., Kong F., Xi M. Inorganic carbon sequestration and its mechanism of coastal saline-alkali wetlands in Jiaozhou Bay, China // *Geoderma*. 2019. V. 351. P. 221–234. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.05.027
32. Danevčič T., Mandić-Mulec I., Stres B., Stopar D., Hacin J. Emissions of CO₂, CH₄ and N₂O from Southern European peatlands // *Soil Biol. Biochem.* 2010. V. 42. No. 9. P. 1437–1446. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.05.004
33. Kirui B., Huxham M., Kairo J.G., Mencuccini M., Skov M.W. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide flux in a restored young mangrove plantation at Gazi Bay // *Advances in Coastal Ecology: People, Processes and Ecosystems in Kenya* / Eds. J. Hoorweg, N. Muthiga. Leiden: African Studies Centre, 2009. V. 20. P. 122–130.
34. Chen G.C., Tam N.F.Y., Ye Y. Spatial and seasonal variations of atmospheric N₂O and CO₂ fluxes from a subtropical mangrove swamp and their relationships with soil characteristics // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 48. P. 175–181. doi: 10.1016/j.soilbio.2012.01.029
35. Allen D.E., Dalal R.C., Rennenberg H., Meyer R.L., Reeves S., Schmidt S. Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39. No. 2. P. 622–631. doi: 10.1016/j.soilbio.2006.09.013
36. Marín-Muñoz J.L., Hernández M.E., Moreno-Casasola P. Greenhouse gas emissions from coastal freshwater wetlands in Veracruz Mexico: Effect of plant community and seasonal dynamics // *Atmos. Environ.* 2015. V. 107. P. 107–117. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.036
37. Smith K.A., Ball T., Conen F., Dobbie K.E., Massheder J., Rey A. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes // *Eur. J. Soil. Sci.* 2018. V. 69. No. 1. P. 10–20. doi: 10.1111/ejss.12539
38. Chanda A., Akhand A., Manna S., Dutta S., Das I., Hazra S., Rao K.H., Dadhwal V.K. Measuring daytime CO₂ fluxes from the inter-tidal mangrove soils of Indian Sundarbans // *Environ. Earth Sci.* 2014. V. 72. No. 2. P. 417–427. doi: 10.1007/s12665-013-2962-2
39. Torres-Alvarado M.D.R., Pérez Muñoz T., Maldonado-Vela N.B. Methanogenesis in sediments of a tropical coastal wetland: a culture-dependent method // *Revista de Biología Tropical*. 2024. V. 72. No. 1. Article No. e57126. doi: 10.15517/rev.biol.trop.v72i1.57126

О применении искусственного интеллекта и больших языковых моделей в области почвенно-экологических исследований (обзор)

© 2026. Н. А. Боков¹, аспирант, м. н. с.,

И. Г. Широких^{1, 2}, д. б. н., зав. лабораторией, в. н. с.,

¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. 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,
e-mail: biotekhnologiya@fanc-sv.ru

В последние годы в научных исследованиях активно развиваются методы, основанные на использовании искусственного интеллекта (ИИ) и больших языковых моделей (БЯМ), которые способны обрабатывать и интерпретировать значительные объёмы текстовой и структурированной (таблицы, числовые и категориальные данные, данные датчиков и т. п.) информации. Экология почвы как область, характеризующаяся быстрым накоплением разнородных данных, включая результаты метагеномных анализов почвенных микробиомов, может потенциально извлечь существенную пользу от применения подобных инструментов. В настоящем обзоре рассмотрены основные направления использования ИИ в исследованиях в области почвенной экологии и микробиологии, включая анализ научной литературы, аннотирование и систематизацию микробиологических, агрохимических и агрофизических данных, а также создание моделей для прогнозирования на основе метагеномных данных почвенных микробиомов показателей плодородия и продуктивности сельскохозяйственных угодий. Обсуждаются ключевые преимущества данных подходов, их ограничения и возможные методологические риски. Несмотря на необходимость дальнейшего усовершенствования и оптимизации имеющихся к настоящему времени технологий ИИ и БЯМ, выполненный анализ литературы свидетельствует об их значительном потенциале в обеспечении дальнейшего развития почвенно-экологических исследований и достижении практических результатов в аграрном производстве.

Ключевые слова: искусственный интеллект, нейронные сети, машинное обучение, большие языковые модели, экология микроорганизмов, почвенный микробиом, метагеномика, аграрное производство.

On the application of artificial intelligence and large language models in soil and environmental research: a review

© 2026. N. A. Bokov¹ ORCID: 0000-0002-1000-1192²

I. G. Shirokikh^{1, 2} ORCID: 0000-0002-3319-2729²

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,
e-mail: biotekhnologiya@fanc-sv.ru

In recent years, scientific research has seen the rapid development of methods based on artificial intelligence (AI) and large language models (LLMs), which are capable of processing and interpreting significant volumes of text and structured information, including tables, numerical and categorical data, and sensor data and other heterogeneous information, using specialized and multimodal AI systems. Soil ecology, as a field characterized by the rapid accumulation of heterogeneous data, including the results of metagenomic analyses of soil microbiomes, can potentially benefit significantly from the application of such tools. The aim of this review is to identify, analyze, and summarize current approaches to the use of AI and LLM technologies in soil and environmental research. The review examines the main areas of AI application, including scientific literature search and analysis, semantic search for relevant publications, citation mapping, text summarization, and the use of generative AI assistants. Particular attention is paid to the application of AI methods in the analysis of soil microbiomes and to the potential use of metagenomic data for predicting soil fertility and agricultural productivity. The challenges associated with adapting

AI methods originally developed for biomedical research to the specific characteristics of soil and environmental datasets are also considered. The key advantages of these approaches, their limitations, and potential methodological risks, including those related to data quality and the reliability of AI-generated information, are discussed. Despite the need for further improvement and optimization of currently available AI and LLM technologies, the literature review demonstrates their significant potential for advancing soil and environmental research and supporting practical applications in agriculture.

Keywords: artificial intelligence, neural networks, machine learning, large language models, microbial ecology, soil microbiome, metagenomics, agricultural production.

Почва представляет собой верхний тончайший слой (в среднем 1–2 м) земной коры, сформированный в результате почвообразовательного процесса и обладающий плодородием. В отличие от почвообразующих горных пород, почва характеризуется наличием органического вещества, активной биоты, развитой системой горизонтов и плодородием – способностью обеспечивать рост и развитие растений. Представление о почве как особом природном образовании, формирующемся в течение длительного периода времени при взаимодействии компонентов и факторов живой и неживой природы, было сформулировано в конце 19 века основоположником русской школы почвоведения В. В. Докучаевым [1, 2].

Почвенные ресурсы играют ключевую роль в развитии сельского хозяйства, функционировании экосистем и обеспечении продовольственной безопасности государства. Вместе с тем, почва – истощаемый и плохо возобновляемый ресурс. Образование новых слоёв почвы происходит зачастую медленнее, чем её деградация под действием природных и антропогенных факторов, что приводит к нарушению круговоротов воды и биогенных элементов, сокращению биологического разнообразия, ставит под угрозу сельское хозяйство [3, 4]. Наиболее значимый и заметный вклад в ухудшение ситуации вносит растениеводство. Большая часть территории России непригодна для возделывания сельскохозяйственных культур, поэтому регионы с благоприятными климатическими условиями испытывают большую нагрузку на почвенный покров, что ведёт к истощению и загрязнению почв и водных ресурсов. Внесение удобрений, использование ядохимикатов и нарушение целостности почвенных горизонтов в результате механической обработки, использование монокультур и ограниченные севообороты являются основными причинами негативных экологических последствий сельскохозяйственной практики: истощения почвенных ресурсов и деградации окружающей среды [5, 6], утраты биоразнообразия – главного показателя биологического здоровья почвы [7]. Устойчивые методы ведения сельского

хозяйства, сохранение и восстановление почв, а также меры по ограничению использования минеральных удобрений играют ключевую роль в поддержании здоровья почвы и продуктивности растениеводства [8, 9].

Фундаментальную роль в биогеохимических циклах, круговоротах биогенных элементов и устойчивости агроэкосистем в целом играют микроорганизмы [10–12]. Почвенная микробиология становится в последние десятилетия одной из ключевых областей биологических и экологических исследовательских проектов. Микробная биомасса и микробное разнообразие – это ключевые показатели здоровья почвы. Для их определения используются как традиционные методы, основанные на культивировании грибов и бактерий на селективных средах, так и самые передовые мультиомиксные подходы, значительно расширяющие разнообразие выявляемых таксонов, а также позволяющие прогнозировать функциональную структуру и метаболический профиль почвенного микробиома [13].

Одним из наиболее распространённых методов изучения таксономической структуры микробных сообществ является метабаркодирование, основанный на анализе выделяемой из почвы общей ДНК. Проведение анализа включает амплификацию с использованием полимеразной цепной реакции (ПЦР) специфических участков, таких как 16S рРНК для бактерий и ITS (Internal Transcribed Spacer – внутренний транскрибируемый спейсер) и/или 18S рРНК для грибов, за которой следует высокопроизводительное секвенирование, например, с использованием методов секвенирования нового поколения (Next Generation Sequencing – NGS) [14]. В исследованиях с помощью гено-молекулярных методов на показатели почвенного микробиома существенно влияют метод отбора проб, размер выборки, способы экстракции ДНК и методы биоинформатического анализа [15]. В числе недостатков данного подхода отмечают потенциальные искажения, возникающие во время экстракции и амплификации ДНК, трудности в идентификации живых/мёртвых микробных клеток и близкородственных

видов или подвидов, проблемы, связанные с неполнотой имеющихся в настоящее время баз геномных данных [16, 17]. Кроме того, присутствие ингибиторов ПЦР (гуминовые и фульвокислоты, тяжёлые металлы и полисахариды) в образцах почв может осложнить процесс амплификации и привести к неполной представленности некоторых таксонов [18]. Для преодоления названных ограничений разрабатываются новые методические подходы и совершенствуются существующие технологии. Например, для повышения таксономического разрешения рекомендуется комбинировать несколько генетических маркеров. А платформы PacBio (Pacific Bioscience) и Oxford Nanopore, разработанные для анализа протяжённых участков генома, позволяют получать данные о нуклеотидных последовательностях РНК и ДНК с более высокой точностью по сравнению с традиционными методами NGS, а также более качественно собирать геномы и подробнее характеризовать сложные микробные сообщества [18]. Выявление присутствующих в почве родов и/или видов микроорганизмов может раскрыть ценные сведения об окружающей среде, поскольку определённые микроорганизмы могут служить «видами-индикаторами» или «биомаркерами», под которыми понимают таксономические группы со значительными различиями в численности в разных микробиомах [16].

Наряду с техническим совершенствованием научного инструментария, огромное значение в современной науке имеет способность человека систематизировать отдельные явления, факты, процессы, потому что без этого разделения на различные категории их было бы очень сложно глубоко анализировать, полноценно изучать, находить им применение и использовать на благо человечества. Вместе с тем, быстрый рост объёма экспериментальных данных и научных публикаций создаёт серьёзные трудности для их систематизации, интерпретации и интеграции в единую концептуальную картину. Так, развитие высокопроизводительных методов секвенирования привело к экспоненциальному увеличению объёма данных, характеризующих таксономический состав, функциональные гены и метаболический потенциал почвенных микробных сообществ [19]. Анализ подобных данных требует применения сложных биоинформатических инструментов и междисциплинарных подходов, объединяющих знания в области микробиологии, экологии, статистики

и информатики. Кроме того, исследователи сталкиваются с проблемой информационной перегрузки, связанной не только с объёмом первичных данных, но и с быстрым ростом числа публикаций, зачастую содержащих фрагментарные или слабо сопоставимые результаты [20].

В условиях возрастающего количества научной информации и увеличения её сложности для восприятия всё большую актуальность приобретает в научно-исследовательской деятельности использование методов искусственного интеллекта (ИИ). Особый интерес представляют большие языковые модели (БЯМ или Large Language Models – LLM), способные обрабатывать и интерпретировать значительные объёмы текстовой информации, выявлять скрытые закономерности и формировать связные текстовые представления знаний. В отличие от традиционных алгоритмов машинного обучения, ориентированных на решение узкоспециализированных задач, БЯМ демонстрируют универсальность и могут использоваться для более широкого спектра аналитических и интерпретационных задач.

Библиометрический анализ, проведённый в базе данных Web of Science за период 2000–2024 гг., показал, что различным аспектам использования методов ИИ в научных исследованиях были посвящены 6883 статьи [21]. Однако модели для оценки состояния здоровья почвы и прогнозирования продуктивности и устойчивости агроэкосистем, разработанные с использованием методов ИИ на основе физико-химических и микробиологических параметров почвенного покрова, в литературе встречаются достаточно редко.

Цель настоящего обзора – поиск, анализ и обобщение информации по использованию технологий ИИ и БЯМ при проведении почвенно-экологических исследований.

Объекты и методы исследования

Сбор информации по теме обзора включал электронный поиск научных публикаций в базах данных PubMed (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>), Scopus (<http://www.scopus.com/>), Академия Google (<https://scholar.google.ru>) и в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU (<http://www.elibrary.ru>) за последнее десятилетие. Поисковые запросы включали следующие ключевые слова и словосочетания: «искусственный интеллект», «большие языковые модели», «почвенное микробное сообщество», «почвенный мета-

геном» «прогнозирование здоровья почвы», «мониторинг», «метабаркодинг», «здоровье почвы», «микробные индикаторы», «растениеводство», «агрономия». Отобранная литература была рассмотрена, проанализирована, распределена по категориям и представлена в соответствующих разделах обзора.

Интеграция ИИ в анализ научной информации. Традиционные методы работы с научной литературой, основанные на ручном анализе источников, требуют значительных временных затрат и не всегда позволяют охватить весь массив доступной информации [22]. В условиях быстрого роста числа научных публикаций исследователи сталкиваются с проблемой эффективного поиска, отбора и обобщения релевантных публикаций. Интеграция ИИ в рабочий процесс способствует увеличению скорости и масштабируемости скрининга литературы, позволяя быстро обрабатывать и анализировать большие объёмы информации. Использование ИИ не только облегчает процесс поиска нужной литературы, но и позволяет выявлять скрытые закономерности и взаимосвязи между различными работами, генерировать новые идеи и идентифицировать ранее неочевидные связи между результатами исследований. Эта способность выявлять скрытые закономерности особенно ценна при проведении научных исследований [23]. Современные БЯМ могут систематизировать информацию по темам, выделяя пробелы в знаниях (белые пятна) и помогая пользователям быстрее воспринимать сложный контент. При работе с литературой современные ИИ-агенты используют БЯМ, но исследования, посвящённые непосредственно ИИ-помощникам, находятся пока на начальной стадии. Нерешённой, например, остаётся проблема галлюцинаций (ложных или сфабрикованных результатов), полученных в результате «рассуждений» ИИ [23]. Галлюцинации БЯМ возникают из-за создания правдоподобно звучащих, но неверных или сфабрикованных фактов. Галлюцинации могут включать вымышленные цитаты, выдуманные факты или вводящую в заблуждение информацию. Таким образом, чрезмерная зависимость пользователя от резюме ИИ, без проверки и перепроверки, может приводить к появлению в научных работах не существующей или заведомо неверной информации. Пользователи склонны слепо доверять контенту, сгенерированному ИИ, в случаях, когда резюме кажутся авторитетными (резюме или обзор, написанный на основе реально существующей статьи), даже

если в действительности это не так [24]. Кроме того, возможности ИИ ограничены данными, которые были использованы в процессе предварительного обучения модели [25]. Предвзятость или пробелы в знаниях, особенно когда модели не имеют доступа к платным или специализированным источникам научной литературы, могут исказить рассуждения или непреднамеренно упустить важную информацию, ограничивая точность и полноту анализа научной литературы [23].

Существуют также проблемы с воспроизводимостью и прозрачностью, которые являются критичными требованиями к научному результату: ИИ-агенты действуют в режиме «чёрного ящика», каждый раз генерируя немного разные ответы на один и тот же запрос. Это делает воспроизводимость и проверяемость результата, к сожалению, не всегда возможными.

Существуют также этические проблемы, связанные с плагиатом. Текст, созданный с помощью ИИ, может непреднамеренно содержать заимствования или создавать новый синтетический текст, что ставит под вопрос его авторство. Также существует опасение, что чрезмерная автоматизация может подрывать человеческие навыки аналитической деятельности, такие как критическое мышление и творческий анализ, который всегда был неотъемлемой частью научной работы [26].

Инструменты для отбора и анализа литературы. Такие инструменты, как Abstrackr, ASReview, EPPI-Reviewer и Rayyan предназначены для автоматического поиска статей по заголовкам, аннотациям, ключевым словам. Abstrackr и ASReview – это системы на основе машинного обучения, разработанные для помощи в написании литературных обзоров, способные к полуавтоматическому отбору литературы по заданной теме [27]. Платформы Rayyan и EPPI-Reviewer ориентированы на управление рабочим процессом, отбор и метаанализ литературы, но требуют обучения пользователей по работе с данными программами и предлагают ограниченные функции ИИ [27]. Выбор инструмента зависит от конкретных задач, предпочтений пользователя и типа информации, которую необходимо найти.

Генеративные ИИ-помощники. Относимые к этой группе ChatGPT, DeepSeek, Gemini, YandexGPT, GigaChat и другие могут реферировать научные статьи, интерпретировать результаты, формулировать новые концепции, предлагать темы для проведения дальнейших исследований, поддерживать

принятие решений, трактовать исследовательские гипотезы [28]. Пример использования таких ИИ-помощников – это генерация идей и составление резюме. Сгенерированный ими текст следует рассматривать исключительно как предварительный, требующий редактуры и серьёзной перепроверки. Любые вызывающие сомнение, чрезмерно обобщённые, слабо обоснованные или неточные утверждения, сгенерированные ИИ, необходимо рассматривать критически или отбрасывать.

Инструменты семантического поиска и поиска релевантных научных публикаций реализуют подход, основанный не на совпадении ключевых слов, а на понимании смысла и контекста запроса. К этой группе инструментов относятся Consensus, Elicit, Semantic Scholar и Perplexity, которые помогают в семантическом поиске литературы, предлагая пользователю более релевантные результаты по сравнению с традиционными методами поиска, основанными на ключевых словах [29]. Инструменты семантического поиска, управляемые ИИ, могут выявлять концептуально связанные работы, которые не имеют одинаковых ключевых слов, автоматически

проверять большие объёмы аннотаций на релевантность и рекомендовать валидные или тематически связанные статьи посредством анализа сети цитирования. Эти возможности особенно ценны, если литература по изучаемому предмету отличается фрагментарностью, а также в междисциплинарных исследованиях, где релевантная литература часто разбросана по нескольким областям знаний.

Инструменты для составления карт цитирования Connected Papers, Litmaps, Research Rabbit и Scite изучают контекст цитирования, анализируют связи цитирования, выявляют фундаментальные и практически ориентированные исследования, визуализируют научные сети цитирований (рис. 1).

Инструменты для составления карт цитирования и визуализации данных могут быть полезными для понимания состояния изученности того или иного вопроса, написания обзоров, но характеризуются отсутствием глубоких аналитических функций и имеют ограничения при работе со статистическими данными [29, 31].

Инструменты для составления резюме и анализа текста. К этой группе относятся

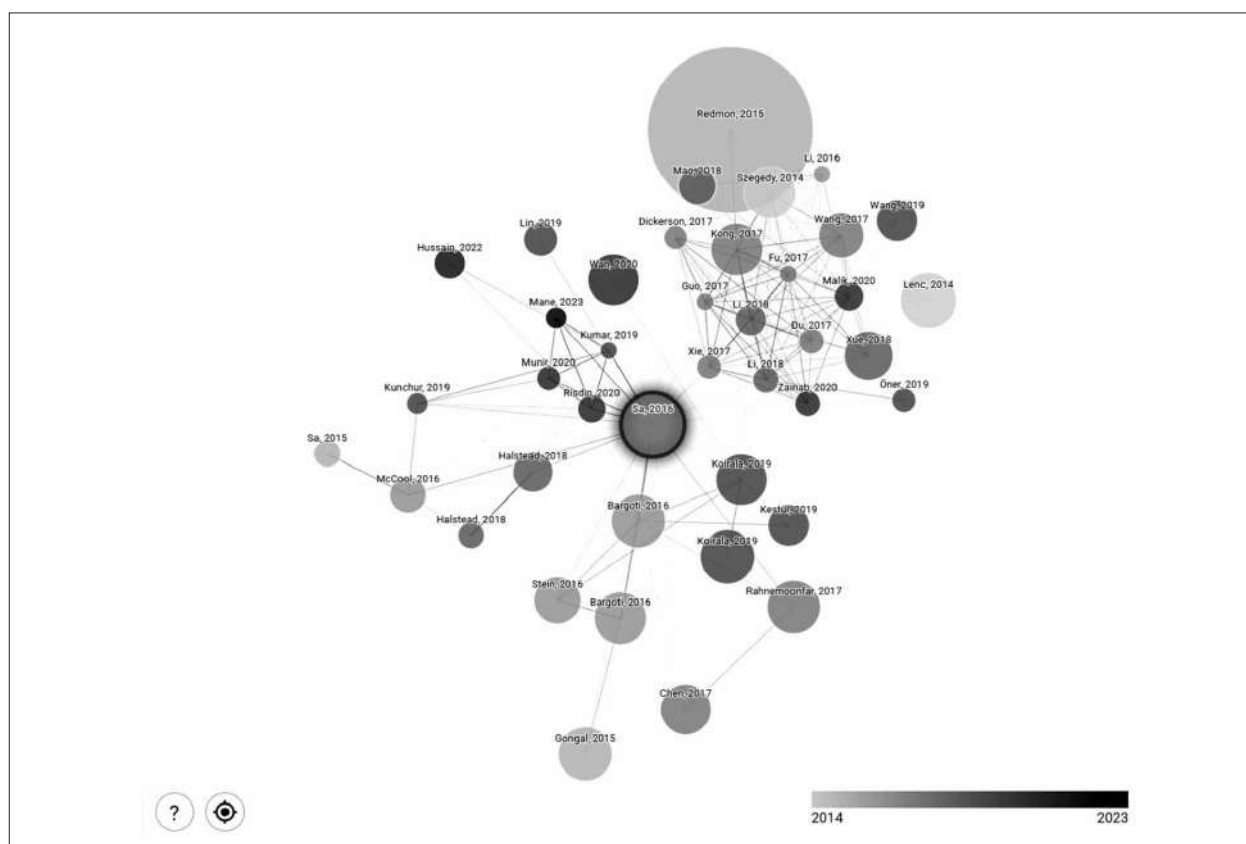


Рис. 1. Карта цитирования статьи (выделена в центре рисунка), созданная в программе Connected Papers. Цит. по [30]

Fig. 1. Citation map of the article (highlighted in the center of the figure), created in the Connected Papers program. Cited from [30]

NotebookLM, Scholarcy, SciSpace, SciSummary и Paper Digest. Они позволяют выделять ключевые моменты, технически упрощать содержание текста, составлять резюме [29].

Инструменты ИИ могут использоваться на различных этапах процесса обзора литературы для повышения эффективности, точности и полноты отображения информации. Одно из основных применений – полностью или частично автоматизированный поиск литературы, при котором базы данных, управляемые ИИ, и алгоритмы обработки естественного языка могут извлекать релевантные источники более эффективно, чем традиционный поиск по ключевым словам [32]. Расширенный поиск организован в форме иерархически выстроенной системы фильтров и логических операций по атрибутам элементов.

Ещё одна ценная функция – извлечение метаданных, библиографических сведений, оформление списков библиографических источников, что снижает нагрузку на пользователя. Системы ИИ могут извлекать из статей в структурированном формате методологическую информацию и сортировать информационные записи по названию, автору, типу источника, дате, издательству, языку и другим характеристикам. Для обеспечения контроля за этим процессом в работе должны быть контрольные точки проверки с обязательным участием человека.

Инструменты на базе ИИ способны выявлять при обзоре литературы закономерности, классифицировать литературу или оценивать её релевантность. Исследователи при этом должны критически проверять полученные результаты, чтобы избежать обусловленной алгоритмом предвзятости или неверной интерпретации исходных данных. В конечном итоге, наиболее эффективно рассматривать ИИ как вспомогательный инструмент, дополняющий человека, а не заменяющий его творческое участие.

Технологии ИИ в анализе почвенных микробиомов

Состав почвенного микробиома отражает экологическое состояние почвы, её здоровье, поскольку присутствующие в почве микроорганизмы принимают непосредственное участие в биогеохимических процессах. В связи с этим микробные сообщества обладают некоторым прогностическим потенциалом, позволяя судить о том, как эти процессы будут протекать в будущем [33]. Микробиомы могут служить

моделью для прогнозирования экосистемных процессов, поскольку они непосредственно в них участвуют.

Способствовать повышению эффективности управления почвенным плодородием и в целом экологической устойчивости сельскохозяйственного производства может использование универсального индекса качества почвы (Soil Quality Index, SQI). Этот индекс должен быть достаточно гибким, чтобы учитывать региональные особенности, но при этом позволять проводить сравнительные оценки. Достижения в области ИИ открыли новые возможности по созданию прогностических моделей в этой сфере. Так, в Бразилии, наряду с данными по продуктивности растений, физическими и химическими параметрами почвы, в расчёт SQI были включены почвенные метагеномные данные, а также использованы алгоритмы машинного обучения [34]. Это значительно улучшило прогностическую ценность модели, по сравнению с ранее существовавшими. Возможность практического применения данного индекса сдерживают ограниченность имеющегося у авторов массива данных (микробиологических, молекулярных, физических, химических за период 3–5 лет), и необходимость высоких вычислительных мощностей для обработки и интерпретации результатов.

Параметры почвенного микробиома также использовали в другом исследовании, направленном на разработку прогностической модели, включающей 12 ключевых показателей здоровья почвы [35]. В работе применяли алгоритмы машинного обучения, в частности, метод «случайного леса» (Random forest – RF) [36] и метод опорных векторов (Support Vector Machine – SVM) [37]. В качестве исходных авторы использовали метагеномные данные по бактериальным сообществам из 949 образцов почв, отобранных в пределах различных сельскохозяйственных угодий Северной Америки. Выделено несколько таксонов, включая *Pyrinomonadaceae*, *Nitrososphaeraceae* и *Candidatus Udeaobacter*, наличие которых значимо связано со здоровьем почвы. Авторы отмечают, что биологические показатели здоровья модель прогнозировала с наибольшей точностью, в то время как с химическими и физическими показателями возникли некоторые затруднения. Дальнейшее повышение точности прогнозирования может быть достигнуто посредством увеличения регионально-специфичных наборов данных. Такой вывод свидетельствует о наличии у рассмотренных

моделей фундаментальных ограничений: невозможность прямого переноса прогнозов с одного на другие типы почв и высокая ресурсоёмкость, обусловленная потребностью в огромных массивах информации для оптимизации работы системы.

Подобная работа была проделана в Новой Зеландии для прогнозирования физико-химических характеристик почвы с использованием метода RF [38]. В исследовании определяли состав бактериальных сообществ с помощью метагеномного анализа образцов почв, отобранных в период с 2013 по 2018 гг. в десяти различных регионах страны, с площади, охватывающей приблизительно 196 тыс. км². В общей сложности проанализировано более чем 3000 образцов почв, отобранных с 606 участков с различными типами землепользования. Предложенная модель выявила устойчивую корреляцию между составом бактериальных сообществ и типом землепользования. Выявленная связь обусловлена чувствительностью бактерий к изменениям физико-химических свойств почвы. Наибольший вклад в формирование почвенного прокариотного сообщества вносят такие показатели как кислотность (pH) и соотношение углерода и азота (C:N). Установлено, что различные типы землепользования способствуют формированию бактериальных сообществ с характерным составом. Это даёт возможность определять по составу микробиома тип землепользования с точностью до 85 %. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале метагеномных инструментов в оценке качества почвы и прогнозировании её состояния.

Машинное обучение с использованием RF применялось также в штате Иллинойс (США) при исследовании взаимодействия растений с почвенными микроорганизмами [39]. Авторы продемонстрировали преимущества полногеномного исследования ассоциаций (Metagenome-wide association studies – MWAS) и машинного обучения в прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур на основе состава почвенного микробиома. Установлено, что различия в урожайности сельскохозяйственных культур на шести обследованных полях в значительной степени определялись вариативностью таксонов в почвенном микробиоме. С помощью алгоритмов машинного обучения выявлена связь между большей представленностью таксонов *Bradyrhizobium* и *Gamma-proteobacteria* в почве участков с высокой урожайностью, а таксонов *Actinobacteria*, *Ascomycota*, *Planctomycetales*

и стрептофитовых водорослей – в почве участков с более низкой урожайностью. Предложенная модель способна успешно предсказывать продуктивность сельскохозяйственных культур на основе состава микробиома на уровне порядка с максимальной точностью 0,79.

Рассмотренные примеры демонстрируют ряд общих закономерностей, в частности – зависимость организации почвенных микробиомов от факторов окружающей среды. Состав бактериальных сообществ тесно связан с физико-химическими характеристиками почвы, среди которых наиболее значимыми являются кислотность (pH), соотношение углерода и азота, а также содержание органического вещества. Изменение характера землепользования сопровождается изменением этих параметров, влекущих закономерную перестройку структуры микробных сообществ, и приводит к формированию специфических микробиомов, характерных для различных типов экосистем и агроценозов. Отдельные таксоны микроорганизмов могут выступать индикаторами продуктивности сельскохозяйственных культур и состояния почвы. Использование методов машинного обучения позволило выявить эти зависимости и построить прогностические модели, основанные на анализе большого числа одновременно действующих факторов, что при применении традиционных статистических подходов было бы затруднительным или вовсе невозможным.

Известны другие работы, в которых методы ИИ были использованы для изучения характера взаимных связей между характеристиками почвенных микроорганизмов и физико-химическими свойствами почв [40], для прогнозирования биомассы почвенных микроорганизмов [41], активности почвенных ферментов [42], оценки микробиологических характеристик почвы и структуры бактериального сообщества [43]. Анализ характеристик микробиома в этих работах опирается на широкий спектр вычислительных методов – от традиционных статистических [44] до более сложных алгоритмов на основе ИИ.

Совокупность полученных результатов свидетельствует о том, что методы ИИ позволяют не только автоматизировать обработку метагеномных данных, но и выявлять ранее трудно обнаруживаемые связи между составом почвенных микробных сообществ, физико-химическими свойствами почвы, характером землепользования и продуктивностью агроэкосистем.

Проблема адаптации заимствованных из биомедицины методов ИИ к почвенно-экологическим исследованиям

Необходимо отметить, что методы искусственного интеллекта изначально получили широкое распространение в биомедицинских исследованиях – при анализе роли кишечной микробиоты в поддержании здоровья и развитии заболеваний человека и животных. Впоследствии данный методологический подход был распространён на задачи медицинской диагностики, где алгоритмы машинного обучения (Machine Learning – ML) [45] и глубокого обучения (Deep Learning – DL) [46] применяются для выявления ассоциаций между составом микробиоты и различными патологическими состояниями [47–49]. Адаптация заимствованных из области медицины и здравоохранения методов машинного обучения к нуждам сельского хозяйства сопряжена с многочисленными проблемами, включая количество и качество данных, зачастую разреженность точек отбора проб, гетерогенность почвы, отсутствие однозначных биомаркеров. Ввиду влияния множества неконтролируемых факторов – погоды, топографии и т. д. образцы почв гораздо более гетерогенны, чем биомедицинские. Кроме того, наборы данных по почвенным микробиомам уступают в объёме и глубине секвенирования наборам данных по микробиому человека. Ограниченность почвенных данных зачастую диктует необходимость более сложной биоинформатической обработки в сравнении с данными по микробиому человека [45].

Если исследования микробиома человека сосредоточены в медицине на прогнозировании заболеваний, то в сельском хозяйстве основной целью является идентификация биомаркеров, связанных с плодородием почвы и/или урожайностью сельскохозяйственных культур. Тем не менее, примеры биомедицинского применения методов ИИ могут служить ориентиром для изучения почвенных микробиомов. Алгоритмы машинного обучения могут внести значительный вклад в дальнейшее развитие знаний о здоровье почвы, анализируя большие данные о микробных сообществах и делая прогнозы относительно различных экологических показателей [47].

Процедура анализа данных почвенных микробиомов с использованием методов ИИ сходна с обычной биоинформатической обработкой данных. Важным этапом анализа

микробиома является предварительная подготовка данных, обеспечивающая адекватное формирование входных массивов для точного моделирования методами ML и DL (рис. 2).

Нормализация данных микробиомов необходима для корректировки различий в глубине секвенирования между образцами. Для решения проблемы асимметрии распределений могут быть использованы логарифмические или иные виды преобразований. Для снижения размерности используются такие методы, как анализ главных компонент (PCA) [50], стохастическое вложение соседей с *t*-распределением (*t*-distributed Stochastic Neighbor Embedding – *t*-SNE) [51] и равномерная аппроксимация и проекция многообразия (UMAP – Uniform Manifold Approximation and Projection) [52]. Эти подходы значительно ускоряют обучение моделей [53].

Следующим шагом после предварительной обработки данных является выбор и обучение подходящей модели ML или DL, в зависимости от рабочей гипотезы исследования и характера имеющихся данных. При работе с микробиомами наиболее часто применяются методы: RF [36], градиентного бустинга [54] и метод SVM [37], а в задачах глубокого обучения – нейронные сети, такие как свёрточные нейронные сети (Convolutional Neural Network – CNN) [55], рекуррентные нейронные сети (Recurrent Neural Network – RNN) [56] и автокодировщики [57]. Модели глубокого обучения, в частности CNN и RNN, используются для анализа сложных наборов данных микробиомов и прогнозирования функциональных свойств на основе таксономического состава микробиома. Эти модели специально предназначены для обработки огромных объёмов данных, генерируемых технологиями высокопроизводительного секвенирования геномов [58]. Новые нейронные сети, основанные на физических принципах (Physics-informed neural networks – PINN), перспективны в моделировании роста микробных популяций (в том числе почвенных) с учётом факторов окружающей среды, предоставляя мощный инструмент для изучения динамики развития микробиомов [59]. Применяя этот алгоритм, можно получить всестороннее представление о том, как микроорганизмы взаимодействуют друг с другом, и как эти взаимодействия сказываются на окружающей среде, будь то система агроценоза или человеческий организм [58].

Особенности различных подходов к машинному обучению для анализа данных ми-

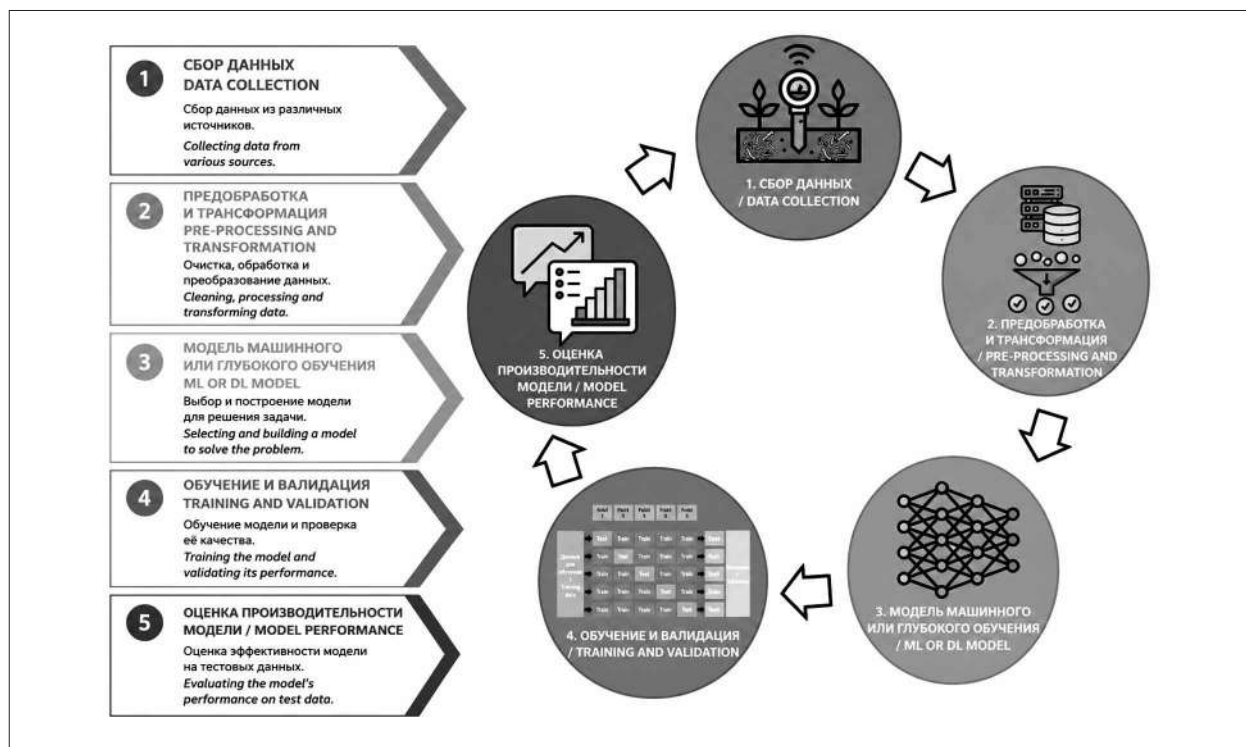


Рис. 2. Основные этапы разработки моделей машинного обучения или глубокого обучения. Цит. по [48] с изменениями

Fig. 2. Main stages of machine learning or deep learning model development. Cited from [48] with modifications

кробиома рассмотрены различными авторами [58–61]. Отмечаются достижения в методах DL и их преимущества перед классическими методами ML.

Следующим шагом в создании прогностических моделей на основе ИИ становятся модели, в которых наряду с физическими, химическими и биологическими характеристиками почвы, интегрированы также агрометеорологические данные. Это обеспечит возможность сопоставлять изменения в составе микробного сообщества с более широким набором различных параметров окружающей среды в целом. Прогресс в данной области уже есть, но для улучшения прогностической точности современных моделей всё ещё требуется слишком большой набор разнородных данных. Кроме того, для хранения всей собранной информации важно использовать централизованную базу данных, фиксировать контекстные метаданные о методах отбора, локациях и условиях отбора проб, что обеспечит основу для дальнейшей интерпретации результатов.

Используя методы метагеномики, исследователи могут выявлять и идентифицировать полезные микроорганизмы (азотфиксирующие бактерии, микоризные

грибы и другие симбиотические микробы) в здоровых почвах, которые улучшают плодородие почвы и стимулируют рост растений. На основе собранных данных и понимания микробной экологии могут быть описаны микроорганизмы-биоиндикаторы, отвечающие за плодородие почв. Если индикаторные виды в почве найдены не были, алгоритмы могут рекомендовать конкретные микробные инокулянты или агрономические практики с учётом уникальных особенностей почвы и выращиваемых культур. Включение этих элементов в систему поддержки принятия решений (СППР) позволит сельхозпроизводителям принимать более обоснованные решения, способствующие устойчивому ведению сельского хозяйства. Обратная связь, поступающая от фермеров, позволит судить об эффективности рекомендованных методов и наблюдаемых изменениях в состоянии почвы, а со временем – точнее настраивать алгоритмы, что критически важно для постоянного совершенствования СППР [62]. Реализация этого процесса потребует, по-видимому, значительного времени, однако результаты будут иметь весомое значение, как для конкретных сельхозпроизводителей, так и для мирового аграрного сектора в целом.

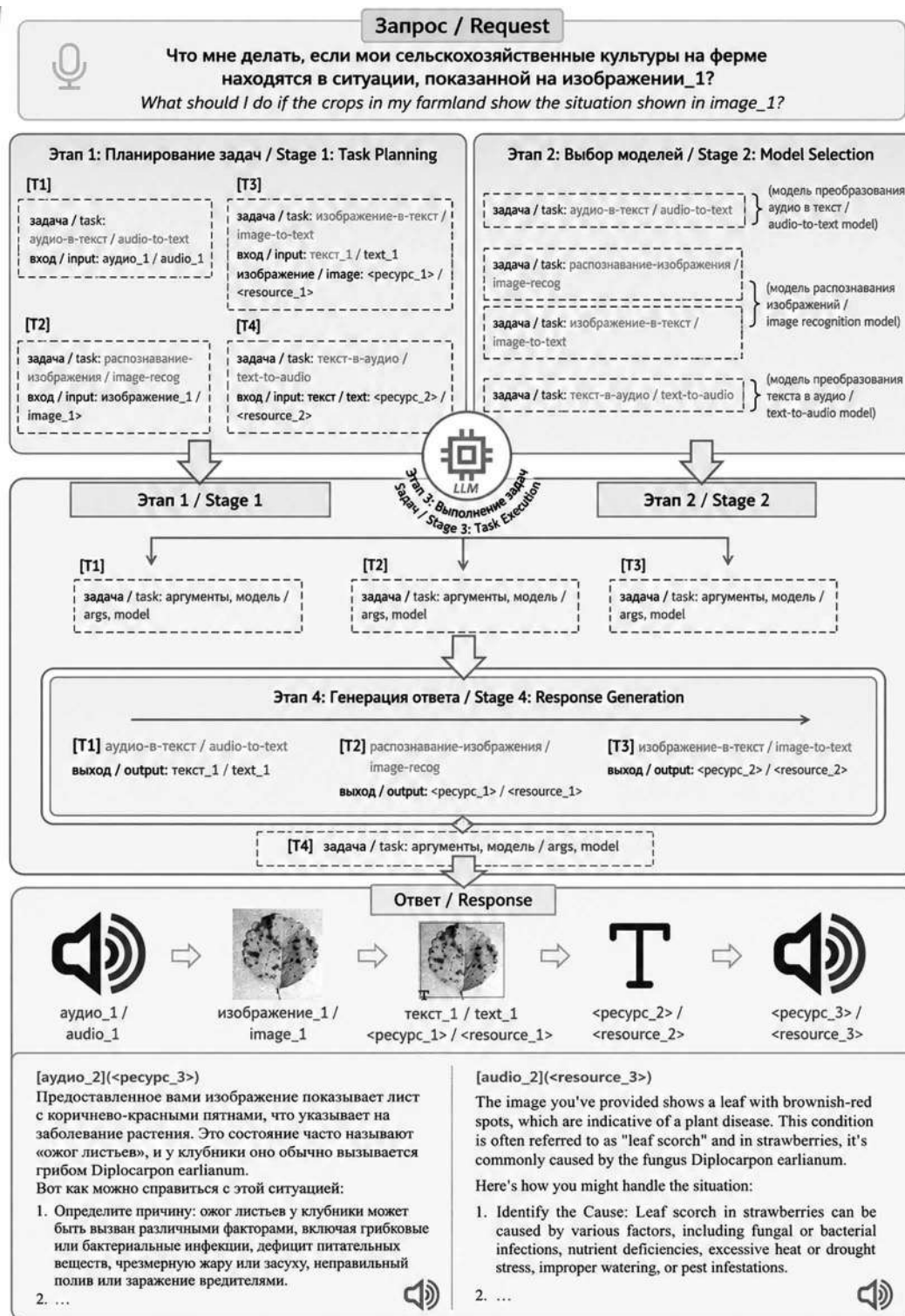


Рис. 3. Схема работы HuggingGPT при запросе по поражению листьев растений пятнами.
 Цит. по [70] с изменениями
 Fig. 3. Flow chart of HuggingGPT for query on leaf spot lesions.
 Cited from [70] with modifications

Перспективы использования технологий ИИ в сельском хозяйстве

Современное сельское хозяйство переходит к «умному» агропроизводству, основанному на роботизации, ИИ, интернете вещей (Internet of Things – IoT) и больших данных для оптимизации урожайности сельскохозяйственных культур при минимизации затрат на воду, удобрения и пестициды [63]. Такие устройства, как датчики влажности почвы, метеостанции и автоматизированные системы орошения, позволяют фермерам отслеживать и контролировать сельскохозяйственные процессы в режиме реального времени. Подключённые к сети интернет датчики обеспечивают непрерывный сбор данных об условиях окружающей среды и состоянии урожая, что позволяет осуществлять точное управление агрономическими процессами и своевременно вносить необходимые корректировки.

Анализ больших данных для выявления скрытых закономерностей, корреляций, тенденций позволит фермерам принимать более обоснованные решения [64]. Наборы данных, собранных с датчиков, расположенных непосредственно на возделываемом участке (датчики влажности, температуры, pH) или дистанционно от обрабатываемой площади (с дронов или спутников), могут с помощью новых вычислительных технологий помочь фермерам оптимизировать распределение ресурсов, прогнозировать урожайность, управлять рисками [65, 66].

Благодаря интеграции новых технологий, фермеры могут выйти за рамки традиционных методов и принимать решения, основываясь на данных, приходящих в режиме реального времени [65]. Сегодня процесс принятия решений облегчается СППР, которые постепенно развивались, включая более сложные инструменты и методы [67]. Благодаря внедрению алгоритмов машинного обучения и прогностических моделей, СППР действительно могут анализировать сложные наборы данных, предлагая новые идеи и практические рекомендации [68]. Предложен ИИ-агент, построенный на основе БЯМ, под названием HuggingGPT. Данная система использует БЯМ как ядро принятия решений в области сельского хозяйства, решая задачи в режиме реального времени, например, отвечая на вопросы фермеров [69]. Пример работы HuggingGPT по формированию ответа на запрос по поражению листьев растений пятнистостью представлен на рисунке 3.

Для ответа на поставленный вопрос система использовала модели: Amazon transcribe, Whisper [71] для преобразования голоса в текст, модель vit-gpt2 для распознавания входящего изображения и генерации текста на его основе, преобразование текстового ответа в аудио производилось с помощью модели FastSpeech [72], в качестве контролера использовали ChatGPT. Большая языковая модель выступает в роли «мозга» агента, выполняя важные функции. При получении запроса на выполнение задачи БЯМ сначала делит всю задачу на подзадачи и выбирает подходящую модель ИИ в зависимости от особенностей каждой подзадачи. Далее происходит агрегация всех решений и ChatGPT формирует резюме для ответа на запрос.

Заключение

Проведённый анализ литературы показывает, что методы искусственного интеллекта становятся перспективным инструментом изучения почвенных микробиомов и оценки состояния почв. В отличие от традиционных статистических подходов, модели машинного и глубокого обучения способны одновременно учитывать большое количество биотических и абиотических факторов, выявлять сложные нелинейные взаимосвязи между составом микробных сообществ и свойствами почвы, а также использовать данные метагеномного анализа для прогнозирования показателей её качества и здоровья. Это делает возможным выявление ранее неочевидных закономерностей в организации почвенных микробных сообществ, а также построение прогностических моделей состояния почвы, пригодных для мониторинга и поддержки принятия решений в сфере сельского хозяйства.

Использование технологий ИИ в изучении и оценке почвенных ресурсов может произвести революцию в нашем понимании подходов к управлению плодородием. Одним из существенных преимуществ моделей ИИ является их способность постоянно обучаться и адаптироваться по мере поступления новых данных. Высокая адаптивность ИИ имеет решающее значение для изучения почвенных микробиомов, отличающихся постоянной изменчивостью под воздействием окружающей среды. По мере поступления новых данных модели могут быть усовершенствованы для построения более точных прогнозов состояния почвы.

Учёным, фермерам и представителям аграрной промышленности необходимо со-

вместно разработать стандартизированные протоколы по сбору и обработке данных, связанных с почвой. Стандартные протоколы, большой объём данных и качественная методологическая база приблизят нас к пониманию того, насколько хорошо ИИ прогнозирует состояние почвы.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ФАНЦ Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого (тема № FNWE-2025-0005) и ФИЦ «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (по теме «Оценка состояния трансформированных экосистем подзоны южной тайги, методические подходы к их биоремедиации», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 125021402208-5).

References

1. Dobrovol'skii G.V. Dokuchaev and present-day natural science // Eurasian Soil Sc. 1996. V. 29. No. 2. P. 105–110.
2. Dokuchaev V.V. Essays: in 9 volumes. Moskva; Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1949–1961. (in Russian).
3. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2007. V. 104. No. 33. P. 13268–13272. doi: 10.1073/pnas.0611508104
4. Dobrovolskiy G.V. Soil degradation as a threat of global ecological crisis // Vek globalizatsii. 2008. No. 2. P. 54–65 (in Russian).
5. Giller K.E., Delaune T., Silva J.V., Descheemaeker K., van de Ven G., Schut A.G.T., van Wijk M., Hammond J., Hochman Z., Taulya G., Chikowo R., Narayanan S., Kishore A., Bresciani F., Teixeira H.M., Andersson J.A., van Ittersum M.K. The future of farming: who will produce our food? // Food Sec. 2021. V. 13. P. 1073–1099. doi: 10.1007/s12571-021-01184-6
6. Kurmanbayev A.A., Syndet T.R. Soil health concept and modern soil health indicators // Soil Science and Agrichemistry. 2023. No. 2. P. 91–106 (in Russian). doi: 10.51886/1999-740X_2023_2_91
7. Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. Microbiological indicators of ecological soil functions: a review // Eurasian Soil Sc. 2022. V. 55. P. 221–234. doi: 10.1134/S1064229322020090
8. Golubev A.S., Berestetskiy A.O. Future directions for use of biological and biorational herbicides in Russia (review) // Agricultural Biology. 2021. V. 56. No. 5. P. 868–884 (in Russian). doi: 10.15389/agrobiol.2021.5.868rus
9. Mohanty L.K., Singh N.K., Raj P., Prakash A., Tiwari A.K., Singh V., Sachan P. Nurturing crops, enhancing soil health, and sustaining agricultural prosperity worldwide through agronomy // J. Exp. Agric. Int. 2024. V. 46. No. 2. P. 46–67. doi: 10.9734/jeai/2024/v46i22308
10. Ryazanov S.S., Kulagina V.I. Soil health: an overview of concepts and monitoring methods // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2026. V. 81. P. 16–31. doi: 10.3103/S0147687425700711
11. Slobodkin A.I., Slobodkina G.B. Diversity of sulfur-disproportionating microorganisms // Microbiology. 2019. V. 88. P. 509–522. doi: 10.1134/S0026261719050138
12. Zavarzina D.G. The role of dissimilatory Fe(III)-reducing bacteria in transformation of iron minerals // Paleontol. J. 2004. V. 38. No. 3. P. 231–237.
13. Vecherskii M.V., Semenov M.V., Lisenkova A.A., Stepankov A.A. Metagenomics: a new direction in ecology // Biol. Bull. Russ. Acad. Sci. 2022. V. 48. Suppl. 3. P. S107–S117. doi: 10.1134/S1062359022010150
14. Semenov M.V. Metabarcoding and metagenomics in soil ecological research: achievements, problems and opportunities // Biol. Bull. Rev. 2021. V. 11. P. 40–53. doi: 10.1134/S2079086421010084
15. Nesme J., Achouak W., Agathos S.N., Bailey M., Baldrian P., Brunel D., Frostegård Å., Heulin T., Jansson J.K., Jurkevitch E., Kruus K.L., Kowalchuk G.A., Lagares A., Lappin-Scott H.M., Lemanceau P., Le Paslier D., Mandic-Mulec I., Murrell J.C., Myrold D.D., Nalin R., Nannipieri P., Neufeld J.D., O'Gara F., Parnell J.J., Pühler A., Py-lro V., Ramos J.L., Roesch L.F.W., Schlöter M., Schleper C., Sczyrba A., Sessitsch A., Sjöling S., Sørensen J., Sørensen S.J., Tebbe C.C., Topp E., Tsiamis G., van Elsas J.D., van Keulen G., Widmer F., Wagner M., Zhang T., Zhang X., Zhao L., Zhu Y.G., Vogel T.M., Simonet P. Back to the future of soil metagenomics // Front. Microbiol. 2016. V. 7. Article No. 73. doi: 10.3389/fmicb.2016.00073
16. Leite M.F.A., van den Broek S.W.E.B., Kuramae E.E. Current challenges and pitfalls in soil metagenomics // Microorganisms. 2022. V. 10. No. 10. Article No. 1900. doi: 10.3390/microorganisms10101900
17. Wydro U. Soil microbiome study based on DNA extraction: a review // Water. 2022. V. 14. No. 24. Article No. 3999. doi: 10.3390/w14243999
18. Veselovsky V., Romanov M., Zoruk P., Larin A., Babenko V., Morozov M., Strokach A., Zakharevich N., Khamidova S., Danilova A., Vatlin A., Pavshintsev V., Chenguang F., Tsybizov D., Mitkin N., Galanova O., Zakharenko A., Golokhvast K., Klimina K. Comparative evaluation of sequencing platforms: Pacific Biosciences, Oxford Nanopore Technologies, and Illumina for 16S rRNA-based soil microbiome profiling // Front. Microbiol. 2025. V. 16. Article No. 1633360. doi: 10.3389/fmicb.2025.1633360
19. D'Argenio V. The high-throughput analyses era: are we ready for the data struggle? // High Throughput. 2018. V. 7. No. 1. Article No. 8. doi: 10.3390/ht7010008
20. Sharpton T.J. An introduction to the analysis of shotgun metagenomic data // Front. Plant Sci. 2014. V. 5. Article No. 209. doi: 10.3389/fpls.2014.00209

21. Panciu B.-I., Barbu Dragne G.-L. A.I. in agriculture – a bibliometric approach // *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*. 2025. V. 19. No. 1. P. 5189–5199. doi: 10.2478/picbe-2025-0397
22. Zhao Y., Liang J., Chen B., Deng X., Zhang Y., Xiong Z., Pan M., Meng X. Applications research progress and prospects of multi-agent large language models in agricultural // *Smart Agric*. 2025. V. 7. No. 5. P. 37–51. doi: 10.12133/j.smartag.SA202503026
23. Sirilertmekasakul C., Rattanawong W., Gongvatana A., Srikiatkachorn A. The current state of artificial intelligence-augmented digitized neurocognitive screening test // *Front. Hum. Neurosci*. 2023. V. 17. Article No. 1133632. doi: 10.3389/fnhum.2023.1133632
24. Saied M., Mokhtar N., Badr A., Adel M., Boles P., Khoriba G. AI in literature reviews: a survey of current and emerging methods // *Proceedings of the 2024 International Mobile, Intelligent, and Ubiquitous Computing Conference (MIUCC)*. Cairo, Egypt, 2024. P. 61–65. doi: 10.1109/MIUCC62295.2024.10783597
25. Naudé W. Artificial intelligence vs COVID-19: limitations, constraints and pitfalls // *AI & Soc*. 2020. V. 35. No. 3. P. 761–765. doi: 10.1007/s00146-020-00978-0
26. Gerlich M. AI tools in society: impacts on cognitive offloading and the future of critical thinking // *Societies*. 2025. V. 15. No. 1. Article No. 6. doi: 10.3390/soc15010006
27. Schmidt L., Cree I., Campbell F., WCT EVI MAP group. Digital tools to support the systematic review process: an introduction // *J. Eval. Clin. Pract.* 2025. V. 31. No. 3. Article No. e70100. doi: 10.1111/jep.70100
28. Filimonov V. Yu. Large language models and their role in modern scientific discoveries // *Philosophical Problems of IT and Cyberspace (PhilIT&C)*. 2024. V. 25. No. 1. P. 42–57 (in Russian). doi: 10.17726/philIT.2024.1.3
29. Mtotywa M.M., Mowers J.L.J., Ndou W., Moleko T.V.Q., Ledwaba M.J. Artificial intelligence in literature review synthesis: a step-by-step methodological approach for researchers and academics // *Informatics*. 2026. V. 13. No. 3. Article No. 43. doi: 10.3390/informatics13030043
30. Sa I., Ge Z., Dayoub F., Upcroft B., Perez T., McCool C. DeepFruits: a fruit detection system using deep neural networks // *Sensors*. 2016. V. 16. No. 8. Article No. 1222. doi: 10.3390/s16081222
31. Fallico N. Exploring Research Rabbit: your new favourite reference manager // *Medical Writing*. 2025. V. 34. No. 1. P. 67–69. doi: 10.56012/wxzm3433
32. Zhang Y., Long J., Zhao W. The curvilinear relationships between relational embeddedness and dynamic capabilities: the mediating effect of ambidextrous learning // *Front. Psychol*. 2022. V. 13. Article No. 830377. doi: 10.3389/fpsyg.2022.830377
33. Correa-Garcia S., Constant P., Yergeau E. The forecasting power of the microbiome // *Trends Microbiol*. 2022. V. 31. No. 5. P. 444–452. doi: 10.1016/j.tim.2022.11.013
34. De Andrade V.H.G.Z., Redmile-Gordon M., Barbosa B.H.G., Andreote F.D., Roesch L.F.W., Pylro V.S. Artificially intelligent soil quality and health indices for ‘next generation’ food production systems // *Trends Food Sci. Technol*. 2021. V. 107. P. 195–200. doi: 10.1016/j.tifs.2020.10.018
35. Wilhelm R.C., van Es H.M., Buckley D.H. Predicting measures of soil health using the microbiome and supervised machine learning // *Soil Biol. Biochem*. 2022. V. 164. Article No. 108472. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108472
36. Breiman L. Random forests // *Mach. Learn*. 2001. V. 45. P. 5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324
37. Cortes C., Vapnik V. Support-vector networks // *Mach. Learn*. 1995. V. 20. P. 273–297. doi: 10.1007/BF00994018
38. Hermans S.M., Buckley H.L., Case B.S., Curran-Cournane F., Taylor M., Lear G. Using soil bacterial communities to predict physico-chemical variables and soil quality // *Microbiome*. 2020. V. 8. No. 1. Article No. 79. doi: 10.1186/s40168-020-00858-1
39. Chang H.X., Haudenschild J.S., Bowen C.R., Hartman G.L. Metagenome-wide association study and machine learning prediction of bulk soil microbiome and crop productivity // *Front. Microbiol*. 2017. V. 8. Article No. 519. doi: 10.3389/fmicb.2017.00519
40. Sadeghi S., Petermann B.J., Steffan J.J., Brevik E.C., Gedeon C. Predicting microbial responses to changes in soil physical and chemical properties under different land management // *Appl. Soil Ecol*. 2023. V. 188. Article No. 104878. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104878
41. Tajik S., Ayoubi S., Nourbakhsh F. Prediction of soil enzymes activity by digital terrain analysis: comparing artificial neural network and multiple linear regression models // *Environ. Eng. Sci*. 2012. V. 29. No. 8. P. 798–806. doi: 10.1089/ees.2011.0313
42. Larsen P.E., Field D., Gilbert J.A. Predicting bacterial community assemblages using an artificial neural network approach // *Nat. Methods*. 2012. V. 9. No. 6. P. 621–625. doi: 10.1038/nmeth.1975
43. Santos E.C., Armas E.D., Crowley D., Lambais M.R. Artificial neural network modeling of microbial community structures in the Atlantic Forest of Brazil // *Soil Biol. Biochem*. 2014. V. 69. P. 101–109. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.10.049
44. Shirokih I.G., Bokov N.A., Shirokih A.A., Ashikhmina T. Ya. Antibiotic resistance profiles of streptomycetes from different soils of the Vyatka Prikamye // *Theoretical and Applied Ecology*. 2026. No. 2. P. 183–191 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2026-2-183-191
45. Langley P. The changing science of machine learning // *Mach. Learn*. 2011. V. 82. P. 275–279. doi: 10.1007/s10994-011-5242-y
46. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // *Nature*. 2015. V. 521. No. 7553. P. 436–444. doi: 10.1038/nature14539
47. Ghannam R.B., Techtmann S.M. Machine learning applications in microbial ecology, human microbiome

studies, and environmental monitoring // *Comput. Struct. Biotechnol. J.* 2021. V. 19. P. 1092–1107. doi: 10.1016/j.csbj.2021.01.028

48. Pace R., Schiano Di Cola V., Monti M.M., Affinito A., Cuomo S., Loreto F., Ruocco M. Artificial intelligence in soil microbiome analysis: a potential application in predicting and enhancing soil health – a review // *Discov. Appl. Sci.* 2025. V. 7. Article No. 85. doi: 10.1007/s42452-024-06381-4

49. Iadanza E., Fabbri R., Bašić-Čičak D., Amedei A., Telalovic J.H. Gut microbiota and artificial intelligence approaches: a scoping review // *Health Technol.* 2020. V. 10. P. 1343–1358. doi: 10.1007/s12553-020-00486-7

50. Gewers F.L., Ferreira G.R., de Arruda H.F., Silva F.N., Comin C.H., Amancio D.R., Costa L.F. Principal component analysis: a natural approach to data exploration // *ACM Comput. Surv.* 2021. V. 54. No. 4. Article No. 70. doi: 10.1145/3447755

51. Van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE // *J. Mach. Learn. Res.* 2008. V. 9. P. 2579–2605.

52. Becht E., McInnes L., Healy J., Dutertre C.A., Kwok I.W.H., Ng L.G., Ginhoux F., Newell E.W. Dimensionality reduction for visualizing single-cell data using UMAP // *Nat. Biotechnol.* 2019. V. 37. P. 38–44. doi: 10.1038/nbt.4314

53. Zeng T., Yu X., Chen Z. Applying artificial intelligence in the microbiome for gastrointestinal diseases: a review // *J. Gastroenterol. Hepatol.* 2021. V. 36. No. 4. P. 832–840. doi: 10.1111/jgh.1550

54. Friedman J.H. Stochastic gradient boosting // *Comput. Stat. Data Anal.* 2002. V. 38. No. 4. P. 367–378. doi: 10.1016/S0167-9473(01)00065-2

55. LeCun Y., Boser B., Denker J.S., Henderson D., Howard R.E., Hubbard W., Jackel L.D. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition // *Neural Comput.* 1989. V. 1. No. 4. P. 541–551. doi: 10.1162/neco.1989.1.4.541

56. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1982. V. 79. No. 8. P. 2554–2558. doi: 10.1073/pnas.79.8.255

57. Liou C.Y., Cheng W.C., Liou J.W., Liou D.R. Autoencoder for words // *Neurocomputing.* 2014. V. 139. P. 84–96. doi: 10.1016/j.neucom.2013.09.055

58. Oh M., Zhang L. DeepMicro: deep representation learning for disease prediction based on microbiome data // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. No. 1. Article No. 6026. doi: 10.1038/s41598-020-63159-5

59. Cuomo S., de Rosa M., Piccialli F., Pompameo L., Vocca V. A numerical approach for soil microbiota growth prediction through physics-informed neural network // *Appl. Numer. Math.* 2024. V. 207. P. 97–110. doi: 10.1016/j.apnum.2024.08.025

60. Papoutsoglou G., Tarazona S., Lopes M.B., Klamsteiner T., Ibrahim E., Eckenberger J., Novielli P., Tonda A., Simeon A., Shigdel R., Béreux S., Vitali G., Tangaro S., Lahti L., Temko A., Claesson M.J., Berland M. Machine learning approaches in microbiome research: challenges

and best practices // *Front. Microbiol.* 2023. V. 14. Article No. 1261889. doi: 10.3389/fmicb.2023.1261889

61. Deng Z., Zhang J., Li J., Zhang X. Application of deep learning in plant–microbiota association analysis // *Front. Genet.* 2021. V. 12. Article No. 697090. doi: 10.3389/fgene.2021.697090

62. Zhao B., Jin W., Del Ser J., Yang G. ChatAgri: Exploring potentials of ChatGPT on cross-linguistic agricultural text classification // *Neurocomputing.* 2023. V. 557. Article No. 126708. doi: 10.1016/j.neucom.2023.126708

63. Popova L.V., Gorshkova N.V., Shaldokhina S.Yu. The introduction of Agriculture technology 4.0: conditions and forecasts // *Bulletin of the Adyge State University, Series “Economics”.* 2019. No. 1. P. 83–89 (in Russian).

64. Zayats O.A., Nazarova Yu.N., Strizhakova E.A., Penkova R.I. Big Data technologies in agriculture // *Fundamental research.* 2022. No. 7. P. 35–40 (in Russian). doi: 10.17513/fr.43280

65. Cravero A., Pardo S., Sepúlveda S., Muñoz L. Challenges to use machine learning in agricultural Big Data: a systematic literature review // *Agronomy.* 2022. V. 12. No. 3. Article No. 748. doi: 10.3390/agronomy12030748

66. Raevskaya E.G. Introducing artificial intelligence in Chinese agriculture (review) // *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka.* 2024. V. 25. No. 5. P. 739–753 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.5.739-753

67. Fenu G., Mallocci F.M. DSS LANDS: a decision support system for agriculture in Sardinia // *HighTech and Innovation Journal.* 2020. V. 1. No. 3. P. 129–135. doi: 10.28991/HIJ-2020-01-03-05

68. Folorunso O., Ojo O., Busari M., Adebayo M., Joshua A., Folorunso D., Ugwunna C.O., Olabanjo O., Olabanjo O. Exploring machine learning models for soil nutrient properties prediction: a systematic review // *Big Data Cogn. Comput.* 2023. V. 7. No. 2. Article No. 113. doi: 10.3390/bdcc7020113

69. Shen Y., Song K., Tan X., Li D., Lu W., Zhuang Y. HuggingGPT: solving AI tasks with ChatGPT and its friends in Hugging Face // *Advances in Neural Information Processing Systems: proceedings of the 37th conference on neural information processing systems.* 2024. V. 36. P. 38154–38180. doi: 10.52202/075280-1657

70. Zhu H., Qin S., Su M., Lin C., Li A., Gao J. Harnessing large vision and language models in agriculture: a review // *Front. Plant Sci.* 2025. V. 16. Article No. 1579355. doi: 10.3389/fpls.2025.1579355

71. Radford A., Kim J.W., Xu T., Brockman G., McLeavey C., Sutskever I. Robust speech recognition via large-scale weak supervision // *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning.* Honolulu, 2023. V. 202. P. 28492–28518.

72. Ren Y., Ruan Y., Tan X., Qin T., Zhao S., Zhao Z., Liu T.Y. FastSpeech: Fast, robust and controllable text to speech // *Advances in neural information processing systems: proceedings of the 33rd conference on neural information processing systems.* Vancouver, 2019. V. 32. No. 285. P. 3171–3180.

Использование данных Landsat-8 для классификации и выделения отвалов вскрышных пород

© 2026. А. А. Перевощикова^{1,2}, м. н. с.,

Н. А. Кобелев², инженер, Т. С. Бачурин², лаборант,

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,

²Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4,
e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

С помощью материалов дистанционного зондирования Земли (спутник Landsat-8) произведена классификация землепользования с выделением отвалов вскрышных пород на закрытом месторождении угля и на разрабатываемом месторождении калийно-магниевых солей. Классификация землепользования на основе снимков дистанционного зондирования – сложная задача, однако точная классификация пикселей в соответствии с классом землепользования представляет собой значительную проблему, которую может решить интерактивная контролируемая классификация. Настоящее исследование было сосредоточено на двух крупных месторождениях полезных ископаемых Пермского края: Кизеловский угольный бассейн – территории посёлков Углеуральский и Шахтный, город Кизел и его микрорайон Рудничный, а также посёлок Шахта; Верхнекамское месторождение солей – окрестности городов Соликамск и Березники. Исследуемые территории были разделены на семь классов землепользования: отвалы территории, водные объекты, сельскохозяйственные участки, пустоши, хвойные леса, смешанные леса, урбанизированные территории. Результаты показали, что площадь шахтных отвалов, выделенных методом интерактивной контролируемой классификации, составила 162,8 га, а площадь эталона – 153,3 га. Площадь солевых отвалов, выделенных методом интерактивной контролируемой классификации, составила 927,9 га, а площадь эталона – 891,4 га. Исследование подчёркивает важность использования изображений дистанционного зондирования для решения проблем, связанных с классификацией землепользования на основе обработки пикселей, являясь одним из этапов экодиагностики, которая позволяет получать объективную информацию о состоянии окружающей среды в местах разработки месторождений полезных ископаемых для прогнозных целей. Применение интерактивной контролируемой классификации даёт возможность более точно определять площади отвалов и анализировать пространственное распределение классов землепользования в горнодобывающих районах Пермского края, что способствует развитию методов точного анализа землепользования с потенциальным применением в различных областях, таких как городское планирование, экологический мониторинг и управление ресурсами.

Ключевые слова: угольное месторождение, месторождение солей, дистанционное зондирование, интерактивная контролируемая классификация, землепользование.

Using Landsat-8 data for classification and delineation of overburden dumps

© 2026. А. А. Perevoshchikova^{1,2} ORCID: 0000-0003-1769-7740²

N. A. Kobelev² ORCID: 0009-0007-3129-5568²

T. S. Bachurin² ORCID: 0009-0008-1825-5091¹

¹Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy Ave., Perm, Russia, 614990,

²Perm State National Research University,
4, Genkel St., Perm, Russia, 614990,
e-mail: aaperevoshchikova@yandex.ru

Earth remote sensing materials (Landsat-8 satellite) were used to conduct a land use classification within both a closed coal deposit and an operating potassium-magnesium salts deposit, focusing on the identification of waste rock dumps. Classifying land use through remote sensing imagery presents a formidable challenge; however, the accurate classification of pixels based on their respective land use characteristics poses a notable difficulty that can be mitigated by employing interactive supervised classification. This research focused on two large reserves located in Perm Krai: the Kizel

Coal Basin (encompassing the areas of Ugleurskiy and Shakhtnyy villages, Kizel with its Rudnichnyy microdistrict, and Shakhta village) and the Verkhnekamskoe Potash Deposit (near Solikamsk and Berezniki). The study areas were divided into seven distinct land use categories: waste dumps, water bodies, agricultural lands, bare lands, coniferous forests, mixed forests, and urban areas. The findings showed that the extent of mine dumps, as identified through the interactive supervised classification, covered 162.8 hectares, with a reference area of 153.3 hectares. The salt dump area, as determined by the interactive supervised classification, covered a total of 927.9 hectares, with a reference area of 891.4 hectares. This study emphasizes the significance of employing remote sensing data for addressing challenges related to pixel-oriented land use classification. This represents one of the phases in environmental diagnostics that facilitates the acquisition of objective data regarding the environmental conditions in areas undergoing the extraction of mineral resources for forecasting. The application of interactive supervised classification offers significant insights regarding the extent of waste areas and the category distribution within the studied mining areas of Perm Krai. It promotes the advancement of precise land use analysis techniques that may be applied across diverse fields, including urban development, ecological surveillance, and resource management.

Keywords: coal deposit, salt deposit, remote sensing, interactive supervised classification, land use.

Большое количество спутниковых изображений с открытым исходным кодом широко используется в современных технологиях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что открывает новые возможности для получения информации о добыче полезных ископаемых и о воздействии горнодобывающей промышленности на окружающую среду (ОС). Экологическое картографирование, являясь одним из этапов экодиагностики, позволяет получить объективную, достоверную и наглядную информацию о состоянии ОС [4]. Однако пространственные особенности ландшафта, наблюдаемые с помощью спутниковых снимков, многогранны. Они объединяют различные поверхности (урбанизированные территории, сельскохозяйственные участки и т.д.) в единый комплекс. Из-за разнообразия и сложности пространственных особенностей, классификация территорий является важной задачей при решении проблем в области землепользования и охраны ОС.

Проблема поиска и идентификации земель, нарушенных в результате горнодобывающей деятельности, актуальна для промышленных регионов, поскольку большая часть данных земель приходится на горнопромышленные отвальные ландшафты (места размещения отходов). Путём выбора и применения надёжного метода классификации, который станет инструментом для решения природоохранных задач в горном деле, возможно точное определение пространственных закономерностей на основе данных спутникового наблюдения.

В настоящее время существуют различные методы классификации цифровых изображений, в частности для добывающей отрасли промышленности, которые имеют свои преимущества и ограничения. При выборе метода классификации необходимо учитывать основные условия и характер решаемой про-

блемы [2]. Например, в работе [3] использована компьютерная обработка спутниковых снимков Landsat. Авторы исследовали пять округов (7500 км²) в восточном Огайо, земли которых были нарушены в ходе открытой добычи угля. Составленные в результате исследования карты горных выработок имели точность классификации в диапазоне от 95,5 до 100 %. Компьютерная обработка данных применима и для определения эффективности мелиоративных работ. В угледобывающем регионе Центральной Пенсильвании [4] она помогла выявить различные виды растительности, возрастные классы и плотность растительного покрова с точностью до 92 %.

Однако при обработке данных (с применением статистических методов) обнаружены некоторые ограничения. К примеру, в работе [5] заключено, что ограничения использования статистических методов в большей степени связаны с допущениями о распределении и лимитом на ввод данных. Многие исследователи утверждают, что алгоритмы машинного обучения, такие как метод опорных векторов (SVM), в большинстве случаев могут классифицировать набор данных с более высокой точностью, нежели обычные классификаторы [6, 7]. Учёными были поставлены эксперименты с двумя эталонными наборами данных изображений ДЗЗ, где точность тестирования, повторяемость и оценка превышают 93 %. Метод SVM также был применён в работе [8] для выявления площадей шахт, отвалов и лесов. Классификация SVM использовалась для обнаружения изменений, связанных с открытой разработкой месторождений. Алгоритм классификации SVM позволил выяснить, что площадь шахт и отвалов сократилась, а площадь лесов увеличилась.

Имеются исследования по использованию данных ДЗЗ для оценки геоэкологической ситуации на объектах добывающей про-

мышленности [9–12]. Благодаря обработке данных спутникового мониторинга, можно дать количественную оценку комплексного уровня техногенного подавления фитоценозов естественной биоты за границами земельного отвода горных предприятий. Метод иерархической классификации растительности на основе лидарной технологии, дерева решений и классификатора случайного леса был опробован на полигоне отходов горнодобывающего района Хайдайгоу [12] и эффективно выявил различия между деревьями и видами трав с точностью классификации до 87,5 % и коэффициентом Каппа 0,79, что было почти на 43 % выше, чем при неконтролируемой классификации, и на 10,7–22,7 % выше, чем при других контролируемых методах классификации.

Методы ДЗЗ также применимы при мониторинге [13] и инвентаризации нарушенных земель в районах добычи угля [14–16] и районах отработки техногенных россыпей [17]. Полученные данные с разновременных многозональных спутниковых снимков в районах добычи угля [14, 15] позволяют установить точные границы терриконов, определить их характеристики, оценить временные изменения и пространственные отношения с другими территориальными объектами, а также сделать вывод о показателях биомассы и покрытия растительным покровом горнопромышленных ландшафтов. В том числе метод классификации применим для обнаружения разновозрастных залежей

эрозионно-опасных территорий [18] и незаконных свалок [19].

На территории Пермского края расположены два крупных месторождения – закрытое месторождение угля Кизеловский угольный бассейн (КУБ) и действующее Верхнекамское месторождение солей (ВКМС), на которых размещено большое количество отвалов вскрышных пород [20–22], негативно воздействующих на ОС [23–25].

Таким образом, целью исследования является выявление и картографирование отвалов вскрышных пород на территории Кизеловского угольного бассейна и Верхнекамского месторождения солей, а также идентификация этих территорий для организации мониторинга и прогнозирования дальнейших изменений в окружающей среде.

Объекты и методы исследования

Исзуемыми территориями для выделения шахтных отвалов на КУБе выбраны посёлки Углеуральский и Шахтный, город Кизел и его микрорайон Рудничный, а также посёлок Шахта в северном участке (рис. 1). Исзуемыми территориями для выделения солеотвалов на ВКМС являются окрестности городов Соликамск и Березники (рис. 1).

Предварительным и ключевым этапом для успешной классификации и выделения шахтных отвалов является получение данных ДЗЗ. Сервис USGS EarthExplorer [26]

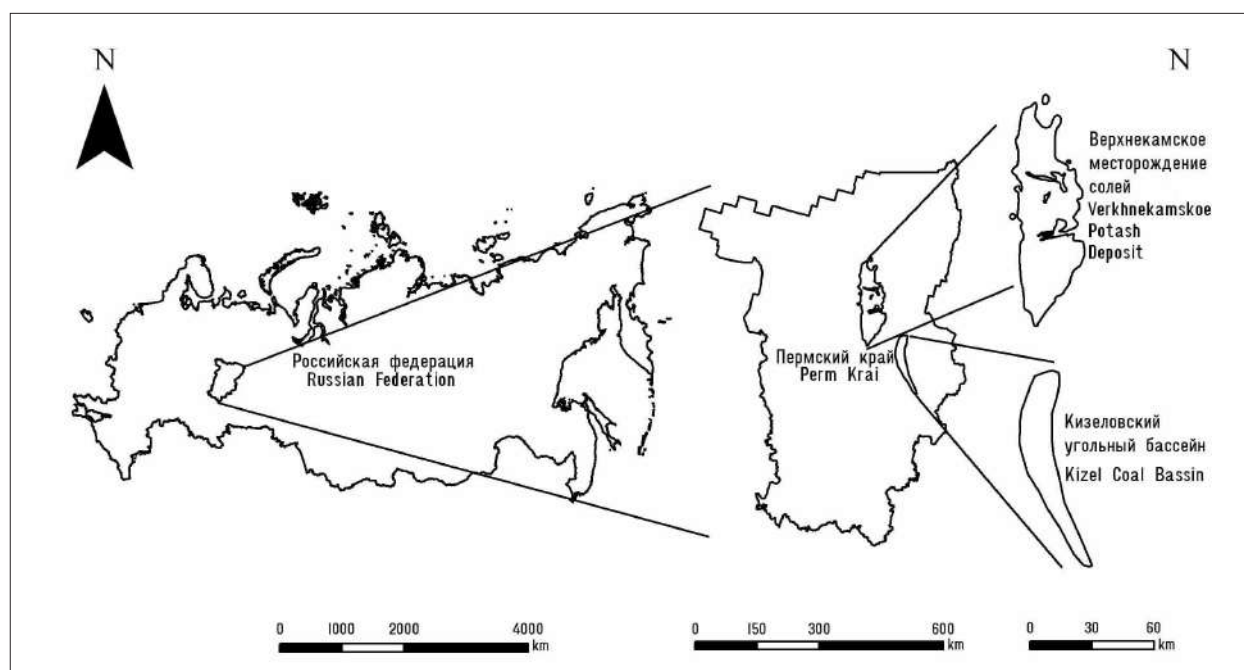


Рис. 1. Территория исследования – Кизеловский угольный бассейн и Верхнекамское месторождение солей / Fig. 1. Study area – Kizel Coal Basin (KCB) and Verkhnekamsk Potash Deposit (VPD)

предоставляет данные со спутников группировки Landsat, включая все спектральные каналы.

В данном исследовании использовался снимок Landsat-8 от 13.06.2023 с пространственным разрешением 30 м/пикс в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне для классификации шахтных отвалов и снимок Landsat-8 от 15.08.2023 с соответствующими спектральными характеристиками для классификации солеотвалов (табл. 1).

Ключевым аспектом исследования являлся анализ средней яркости изображений после их фильтрации через красный (Red), зелёный (Green), синий (Blue) и ближние инфракрасные каналы (NIR, SWIR). Несмотря на обилие имеющихся данных, выделение основных природных и антропогенных объектов обычно выполняется с использованием именно этих каналов [24]. Значения пикселей изображения сохранялись в виде 8-битных целых чисел, а их спектральные каналы объединялись для создания единого композита, который использовался для выполнения классификации. В таблице 1 представлено подробное описание свойств и характеристик данных.

Финальный композит был обработан путём передискретизации при отображении методом кубической свёртки в программе ArcMap и включал в себя 5 спектральных каналов.

Интерактивная контролируемая классификация – это метод анализа данных в программном обеспечении ArcMap от ESRI, позволяющий пользователю активно участвовать в процессе классификации и контролировать его результаты. В рамках использования этого инструмента пользователь предоставляет программе обучающие образцы для каждого класса объектов на изображении. Эти образцы служат основой для определения критериев классификации. Однако, в отличие от традиционной контролируемой классификации, где пользователь выбирает все образцы заранее, в данном инструменте пользователь может

вносить изменения и корректировать процесс классификации в реальном времени на основе предварительных результатов [16].

На рисунке 2 (см. цв. вкладку I) представлены эталонные образцы, используемые для интерактивной контролируемой классификации исследуемых территорий.

Дешифрирование специфических участков горнодобывающих территорий – шахтных отвалов и солеотвалов – прежде всего, связано с такими дешифровочными признаками как форма и цвет объекта в синтезе SWIR-NIR-Red. В данном синтезе отвалы, как и другие нарушенные земельные участки, отображаются различными оттенками, близкими к ярко-розовому цвету, что зависит от разрабатываемой породы. Важным признаком, который помогает в дешифрировании, является наличие подъездных путей и других производственных сооружений. Иные объекты дешифрирования изучались с использованием синтеза каналов NIR-Red-Green. В этой комбинации выделяется растительность по оттенкам красного цвета, городская застройка – зелёно-голубого, а открытая почва по коричневому цвету [24].

Наибольшую сложность на этапе выделения эталонов представляло отделение шахтных отвалов от городской застройки и открытой почвы. Для решения данной проблемы использовался инструмент Arc Toolbox «Фильтр большинства», увеличение числа эталонов для каждого класса (7 эталонов для отвалов, 15 – для других классов). Путём фильтрации изображения и увеличения количества и площади эталонов удалось получить достаточно точное выделение отвалов и других классов.

Инструмент «фильтр большинства» использовался 4 раза со следующими параметрами: число соседних ячеек – EIGHT; порог замещения – MAJORITY. Полученные итоговые карты классификации землепользования составлены с помощью программного обеспечения ArcMap от ESRI.

Таблица 1 / Table 1

Характеристика спектральных каналов Landsat-8
Characteristics of Landsat-8 spectral channels

Landsat-8 OLI		
Номер канала Channel No.	Длина волны, мкм Wavelength, mkm	Пространственное разрешение (м/пикс) Spatial resolution (m/pixels)
2 (Blue)	0,45–0,515	30
3 (Green)	0,525–0,60	30
4 (Red)	0,63–0,68	30
5 (NIR)	0,845–0,885	30
6 (SWIR)	1,56–1,66	30

А. А. Перевощикова, Н. А. Кобелев, Т. С. Бачурин
«Использование данных Landsat-8 для классификации
и выделения отвалов вскрышных пород». С. 31.

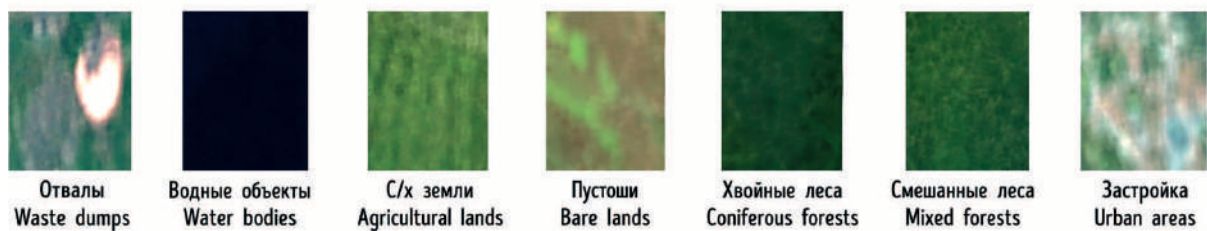


Рис. 2. Образцы классов в синтезе натуральных цветов, используемые для проведения классификации землепользования
Fig. 2. Class samples in natural color synthesis for conducting the land use classification

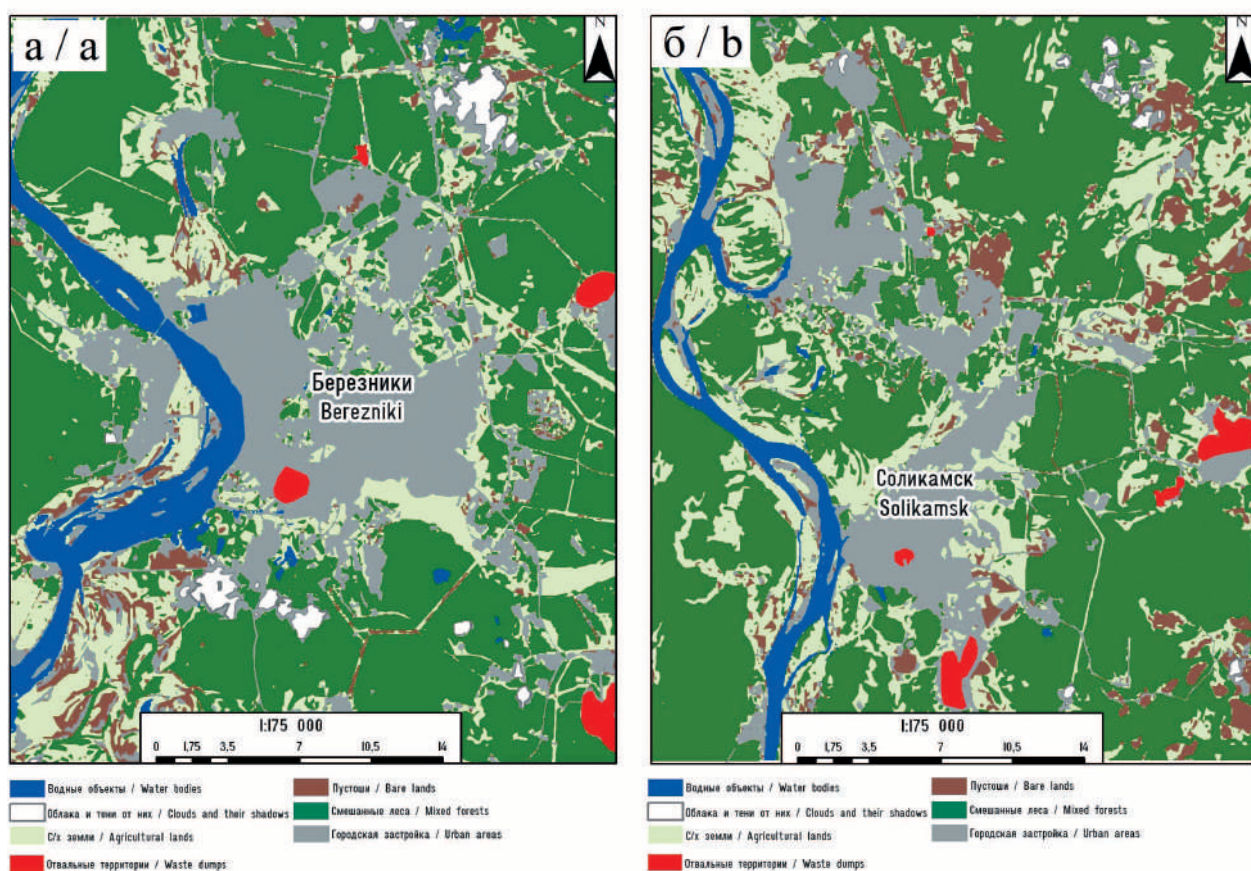


Рис. 3. Итоговая карта классификации землепользования для Верхнекамского месторождения солей в окрестностях г. Березники (а) и г. Соликамска (б)
Fig. 3. The final classification map of the land use for the Verkhnekamskoe Potash Deposit in the vicinity of Berezniki (a) and Solikamsk (b)

А. А. Перевощикова, Н. А. Кобелев, Т. С. Бачурин
«Использование данных Landsat-8 для классификации
и выделения отвалов вскрышных пород». С. 31.

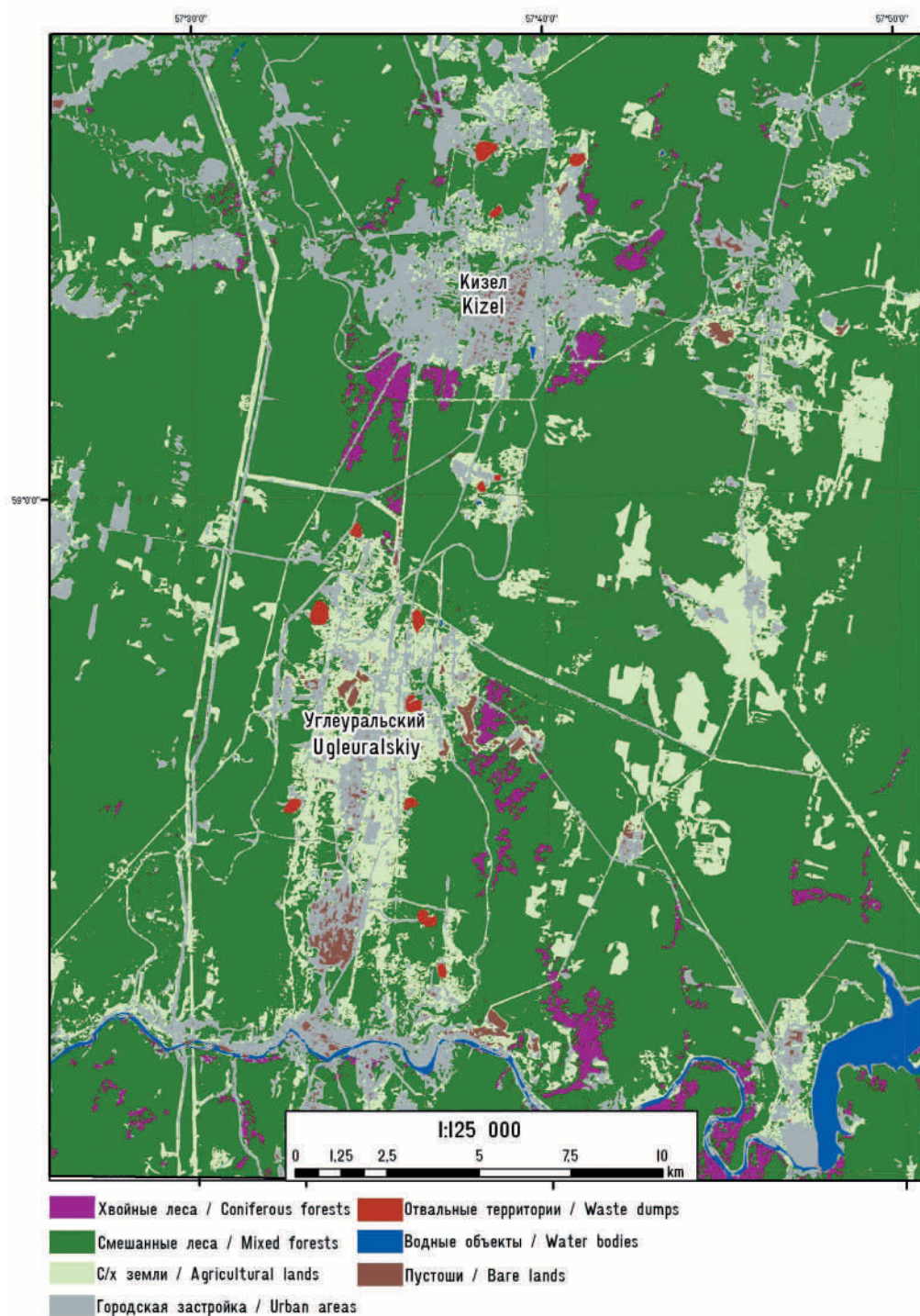


Рис. 4. Итоговая карта классификации землепользования Кизеловского угольного бассейна
Fig. 4. The final classification map of the land use for the Kizel coal basin

Результаты и обсуждение

В результате работы была проведена точная классификация землепользования на изучаемых территориях с выделением шахтных отвалов и солеотвалов как отдельных классов. Оценить её точность позволило выделение отвалов путём ручного дешифрирования и сверки с данными проведённых ранее полевых исследований. Набор данных, полученный в результате этого, принят за эталон отвалов на изучаемой территории. Таким образом, площадь шахтных отвалов, выделенных предложенным методом, составила 162,8 га, а площадь эталона – 153,3 га; площадь солеотвалов составила 927,9 га, а площадь эталона – 891,4 га.

В таблице 2 представлено сравнение статистических показателей двух наборов данных для шахтных отвалов.

Инструментом выделено 106,2 % от площади шахтных отвалов в валидном наборе данных. Это связано с тем, что интерактивной контролируемой классификацией был выделен объект, не являющийся шахтным отвалом.

В случае с солеотвалами было выделено 104,1 % от эталона. Выделение шахтных отвалов подобными инструментами является довольно сложной задачей ввиду малой площади отвалов относительно всей территории исследования. Кроме того, проведённая рекультивация может вызвать отнесение территории отвала к классу пустоши или урбанизированной территории.

Итоговая классификация для территории КУБа включает в себя 7 классов, среди них: 63,9% – смешанные леса; 11,7% – земли сельскохозяйственного использования; 9,5% – хвойные леса; 3,4% – водные объекты; 1,8% – пустоши; 8,8% – застройка; 0,9% – шахтные отвалы.

Итоговая классификация для территории ВКМС также включает в себя 7 классов: 57,1% – смешанные леса; 17,4% – луга и зем-

ли сельскохозяйственного использования; 15% – городская и дачная застройка вместе с иными антропогенными объектами; 4,7% – пустоши, 3,8% – водные объекты; 1,3% – облака и тени от них; 0,7% – солеотвалы.

Итоговым результатом применения инструмента являются карты землепользования с выделением солеотвалов (рис. 3, см. цв. вкладку I) и шахтных отвалов (рис. 4, цв. вкладку II). Для наглядности изображения территория исследования ВКМС разбита на две карты, отдельно для окрестностей г. Березники (рис. 3а) и г. Соликамск (рис. 3б).

Карты классификации землепользования ВКМС в окрестностях г. Березники и г. Соликамска, а также КУБа служат многоцелевой геоинформационной основой, интегрирующей данные ДЗЗ и почвенно-геохимических съёмок. Их целевыми потребителями могут выступать региональные органы исполнительной власти в сфере недропользования и экологического надзора, отраслевые научно-исследовательские институты, а также горнопромышленные компании, реализующие долгосрочные программы освоения и восстановления территорий. Для КУБа они важны для мониторинга и ликвидации экологических последствий (загрязнение вод и почв кислыми шахтными водами), рекультивации нарушенных земель и планирования безопасного хозяйственного использования территорий. Для ВКМС такие карты служат основой для рационального недропользования (планирование добычи калийно-магниевых солей) и оценки геодинамических рисков (проседания, карстообразование).

Заключение

В данном исследовании применялись методы анализа изображений ДЗЗ для клас-

Таблица 2 / Table 2
Сравнительная характеристика двух наборов данных для шахтных отвалов
Comparative characteristic of two datasets for mine dumps

Показатель Indicator	Эталонный набор данных Valid dataset	Тренировочный набор данных Training dataset
Количество / Count	13,00	13,00
Минимум / Minimum	2,99	2,69
Максимум / Maximum	46,75	29,32
Сумма / Sum	153,30	162,80
Среднее / Mean	11,79	12,52
Среднее квадратичное отклонение Standard deviation	11,59	6,56

сификации регионов горнодобывающей промышленности с выделением более семи классов землепользования, а именно: отвальные территории, водные объекты, земли сельскохозяйственного использования, пустоши, хвойные леса, смешанные леса, урбанизированные территории. Использование точной контролируемой классификации позволило выделить и зафиксировать нарушенные (отвальные) территории, что показало возможность использования данного подхода для составления карт землепользования в регионах, где ведётся добыча полезных ископаемых с учётом быстрых изменений в ОС. Результаты, полученные в ходе исследования, показали, что площадь шахтных отвалов, выделенных методом интерактивной контролируемой классификации, составила 162,8 га, а площадь эталона – 153,3 га. Площадь солеотвалов, выделенных предложенным нами методом, составила 927,9 га при площади эталона – 891,4 га. Итоговым результатом применения инструмента являются карты землепользования с выделением шахтных отвалов и солеотвалов для горнодобывающих районов Пермского края. Сравнение полученных карт с эталонными образцами позволило установить, что точность идентификации отвалов методом интерактивной контролируемой классификации отличается всего на 4–6 %, однако данный метод обладает рядом преимуществ перед ручной классификацией. Среди них можно выделить:

- интерактивная контролируемая классификация использует алгоритмы машинного обучения, что позволяет минимизировать субъективность, характерную для ручной классификации;
- данный метод позволяет обрабатывать большие объёмы данных гораздо быстрее и с меньшими трудозатратами по сравнению с ручной классификацией;
- присутствует возможность адаптивной настройки. Это позволяет контролировать процесс обучения алгоритма, что невозможно при полностью ручной классификации, где каждый процесс нужно начинать заново для внесения изменений.

Отмеченные преимущества показывают целесообразность применения метода интерактивной контролируемой классификации для прогнозных целей в условиях быстрых изменений при использовании земельных ресурсов на горнодобывающих территориях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00324).

Литература

1. Ашихмина Т.Я., Менялин С.А., Мамаева Ю.И., Новикова Е.А., Кантор Г.Я. Экологический контроль и мониторинг окружающей природной среды в районе объекта уничтожения химического оружия «Марадыковский» Кировской области // Теоретическая и прикладная экология. 2010. № 1. С. 57–64. doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-057-064
2. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // Int. J. Remote Sens. 2007. V. 28. No. 5. P. 823–870. doi: 10.1080/01431160600746456
3. Tilton III E.L. Marine resources // Third Earth Resources Technology Satellite symposium: proceedings. V. III. Greenbelt, Maryland: Goddard space flight centre, 1974. P. 83–104.
4. Parks N.F., Petersen G.W., Baumer G.M. High resolution remote sensing of spatially and spectrally complex coal surface mines of central Pennsylvania: a comparison between simulated SPOT MSS and Landsat-5 Thematic Mapper // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1987. V. 53. No. 4. P. 415–420.
5. Shafri H.Z.M., Ramle F.S.H. A comparison of support vector machine and decision tree classifications using satellite data of Langkawi Island // Information Technology Journal. 2009. V. 8. No. 1. P. 64–70. doi: 10.3923/itj.2009.64.70
6. Foody G.M., Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. V. 42. No. 6. P. 1335–1343. doi: 10.1109/TGRS.2004.827257
7. Zhang X., Wang Y., Zhang N., Xu D., Chen B. Research on scene classification method of high-resolution remote sensing images based on RFPNet // Appl. Sci. 2019. V. 9. No. 10. Article No. 2028. doi: 10.3390/app9102028
8. Demirel N., Emil M.K., Duzgun H.S. Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery // Int. J. Coal Geol. 2011. V. 86. No. 1. P. 3–11. doi: 10.1016/j.coal.2010.11.010
9. Usikov V.I., Lipina L.N. Geoecological assessment of the Malyi Khingan ridge area using land surface remote sensing data // Journal of Mining Science. 2018. V. 54. No. 2. P. 323–328. doi: 10.1134/S1062739118023690
10. Чащин А.Н., Кондратьева М.А. Использование данных дистанционного зондирования для оценки темпов самозарастания угольных отвалов Кизеловского бассейна // Географический вестник. 2019. № 2 (49). С. 135–147. doi: 10.17072/2079-7877-2019-2-135-147
11. Галченко Ю.П., Калабин Г.В., Озарян Ю.А. Методика геоинформационного мониторинга природно-технических систем на основе данных дистанционного

зондирования // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 68–78. doi: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-68-78

12. Tang J., Liang J., Yang Y., Zhang S., Hou H., Zhu X. Revealing the structure and composition of the restored vegetation cover in semi-arid mine dumps based on LiDAR and hyperspectral images // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 4. Article No. 978. doi: 10.3390/rs14040978

13. Torres R.N., Fraternali P. Learning to identify illegal landfills through scene classification in aerial images // Remote Sens. 2021. V. 13. No. 22. Article No 4520. doi: 10.3390/rs13224520

14. Петкова Н.В., Корниенко Б.Я. Методы ГИС в мониторинге техногенной нарушенности земель Свердловского угольного района (Луганская область) // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. 2020. Т. 2. № 5. С. 43–49. doi: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-43-49

15. Зеньков И.В., Нефедов Н.Б., Морин А.С., Кирюшина Е.В., Вокин В.Н., Веретенова Т.А., Кондрашов П.М., Павлова П.Л., Брежнев Р.В. Технология рекультивации земель при разработке угольных месторождений в северных регионах России // Уголь. 2020. № 4. С. 62–67. doi: 10.18796/0041-5790-2020-4-62-67

16. Kumar A. A Promising automatic system for studying of coal mine surfaces using Sentinel-2 data to assess a classification on a pixel-based pattern // J. Min. Environ. 2024. V. 15. No. 1. P. 41–54. doi: 10.22044/jme.2023.13064.2380

17. Литвинцев В.С., Усиков В.И., Озарян Ю.А., Алексеев В.С. Метод дистанционного зондирования Земли в составе работ по оценке объемов техногенного сырья и экологической обстановки при эксплуатации россыпей // Георесурсы. 2021. Т. 23. № 4. С. 116–123. doi: 10.18599/grs.2021.4.13

18. Сайб Е.А., Безбородова А.Н., Соловьёв С.В., Миллер Г.Ф., Филимонова Д.А. Выявление разновозрастных залежей на эрозионно-опасных территориях юга Западной Сибири с применением геоинформационных технологий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 129–136. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-129-136

19. Aslam B., Maqsoom A., Tahir M.D., Ullah F., Rehman M.S.U., Albattah M. Identifying and ranking landfill sites for municipal solid waste management: An integrated remote sensing and GIS approach // Buildings. 2022. V. 12. No. 5. Article No. 605. doi: 10.3390/buildings12050605

20. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: Раритет-Пермь, 2018. 288 с.

21. Перевощикова А.А., Перевощиков Р.Д., Малышкина Е.Е., Митракова Н.В. Управление отходами калийных горнодобывающих предприятий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335. № 1. С. 19–35. doi: 10.18799/24131830/2024/1/4387

22. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Блинов С.М., Перевощикова А.А. Эффективность рекультивации кислых сульфатных почв в районах угледобычи // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 266–278. doi: 10.31897/PMI.2023.31

23. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit // Mining. 2023. V. 3. No. 2. P. 176–204. doi: 10.3390/mining3020011

24. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс] <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnipo-sobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminovatematicheskoe-deshifrirovaniye-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (Дата обращения: 15.05.2024).

25. Митракова Н.В., Хайрулина Е.А., Порошина Н.В., Перминова А.А., Малышкина Е.Е. Классификация и свойства почв, образовавшихся на рекультивированных угольных отвалах Кизеловского угольного бассейна // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 180–187. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-180-187

26. U.S. Geological Survey [Электронный ресурс] <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Дата обращения: 15.05.2024).

References

1. Ashikhmina T.Ya., Menyalin S.A., Mamaeva Yu.I., Novikova E.A., Kantor G.Ya. Environmental ecological control and monitoring in the vicinity of the chemical weapons decommission plant “Maradikovsky” in Kirov Region // Theoretical and Applied Ecology. 2010. No. 1. P. 57–64 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-057-064
2. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // Int. J. Remote Sens. 2007. V. 28. No. 5. P. 823–870. doi: 10.1080/01431160600746456
3. Tilton III E.L. Marine resources // Third Earth Resources Technology Satellite symposium: proceedings. V. III. Greenbelt, Maryland: Goddard space flight centre, 1974. P. 83–104.
4. Parks N.F., Petersen G.W., Baumer G.M. High resolution remote sensing of spatially and spectrally complex coal surface mines of central Pennsylvania: a comparison between simulated SPOT MSS and Landsat-5 Thematic Mapper // Photogramm. Eng. Remote Sens. 1987. V. 53. No. 4. P. 415–420.
5. Shafri H.Z.M., Ramle F.S.H. A comparison of support vector machine and decision tree classifications using satellite data of Langkawi Island // Information Technology Journal. 2009. V. 8. No. 1. P. 64–70. doi: 10.3923/itj.2009.64.70
6. Foody G.M., Mathur A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines //

- IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2004. V. 42. No. 6. P. 1335–1343. doi: 10.1109/TGRS.2004.827257
7. Zhang X., Wang Y., Zhang N., Xu D., Chen B. Research on scene classification method of high-resolution remote sensing images based on RFPNet // Appl. Sci. 2019. V. 9. No. 10. Article No. 2028. doi: 10.3390/app9102028.
8. Demirel N., Emil M.K., Duzgun H.S. Surface coal mine area monitoring using multi-temporal high-resolution satellite imagery // Int. J. Coal Geol. 2011. V. 86. No. 1. P. 3–11. doi: 10.1016/j.coal.2010.11.010
9. Usikov V.I., Lipina L.N. Geoecological assessment of the Mal'yi Khingan ridge area using land surface remote sensing data // Journal of Mining Science. 2018. V. 54. No. 2. P. 323–328. doi: 10.1134/S1062739118023690
10. Chashchin A.N., Kondratyeva M.A. Using remote sensing data to assess the self-overgrowth rates of coal dumps in the Kizel Basin // Geographical Bulletin. 2019. No. 2. P. 135–147 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2019-2-135-147
11. Galchenko Yu.P., Kalabin G.V., Ozaryan Ju.A. Use of remote sensing data in geoinformation monitoring of natural-technical systems // News of the Tula state university. Sciences of Earth. 2020. No. 1. P. 68–78 (in Russian). doi: 10.46689/2218-5194-2020-1-1-68-79
12. Tang J., Liang J., Yang Y., Zhang S., Hou H., Zhu X. Revealing the structure and composition of the restored vegetation cover in semi-arid mine dumps based on LiDAR and hyperspectral images // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 4. Article No. 978. doi: 10.3390/rs14040978
13. Torres R.N., Fraternali P. Learning to identify illegal landfills through scene classification in aerial images // Remote Sen. 2021. V. 13. No. 22. Article No 4520. doi: 10.3390/rs13224520
14. Petkova N.V., Kornienko B.Ya. GIS methods in monitoring technogenic disturbance of land in the Sverdlovsk coal district (Lugansk region) // Ecology. Economy. Informatics. Series: Geoinformation technologies and space monitoring. 2020. V. 2. No. 5. P. 43–49 (in Russian). doi: 10.23885/2500-123X-2020-2-5-43-49
15. Zenkov I.V., Nefedov N.B., Morin A.S., Kiryushina E.V., Vokin V.N., Veretenova T.A., Kondrashov P.M., Pavlova P.L., Brezhnev R.V. Land remediation technology in the development of coal deposits in the northern regions of Russia // Russian Coal Journal. 2020. No. 4. P. 62–67 (in Russian). doi: 10.18796/0041-5790-2020-4-62-67
16. Kumar A.A. Promising automatic system for studying of coal mine surfaces using Sentinel-2 data to assess a classification on a pixel-based pattern // J. Min. Environ. 2024. V. 15. No. 1. P. 41–54. doi: 10.22044/jme.2023.13064.2380
17. Litvintsev V.S., Usikov V.I., Ozaryan Yu.A., Alekseev V.S. Remote sensing of the Earth as a part of research of assessing the volume of technogenic raw and the environmental situation during the exploitation of placers // Georesursy. 2021. V. 23. No. 4. P. 116–123 (in Russian). doi: 10.18599/grs.2021.4.13
18. Sajb E.A., Bezborodova A.N., Solov'ev S.V., Miller G.F., Filimonova D.A. Identification of different age fallows on erosion-hazardous territories of the south of Western Siberia using geo-information technologies // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. V. 17. No. 4. P. 129–136. doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-129-136
19. Aslam B., Maqsoom A., Tahir M.D., Ullah F., Rehman M.S.U., Albattah M. Identifying and ranking landfill sites for municipal solid waste management: An integrated remote sensing and GIS approach // Buildings. 2022. V. 12. No. 5. Article No. 605. doi: 10.3390/buildings12050605
20. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. Kizelovsky coal basin: environmental problems and solutions. Perm: Raritet-Perm, 2018. 288 p. (in Russian).
21. Perevoshchikova A.A., Perevoshchikov R.D., Malyshkina E.E., Mitrakova N.V. Waste management in potash mining companies // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asses Engineering. 2024. V. 335. No. 1. P. 19–35 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2024/1/4387
22. Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Blinov S.M., Perevoshchikova A.A. Efficiency of acid sulphate soils reclamation in coal mining areas // Journal of Mining Institute. 2023. V. 260. P. 266–278 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2023.31
23. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit // Mining. 2023. V. 3. No. 2. P. 176–204. doi: 10.3390/mining3020011
24. Thematic deciphering and interpretation of satellite images of medium and high spatial resolution [Internet resource] <http://www.psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/shikhov-gerasimov-ponomarchuk-perminova-tematicheskoe-deshifirovanie-i-interpretaciya-kosmicheskikh-snimkov.pdf> (Accessed: 15.05.2024) (in Russian).
25. Mitrakova N.V., Khayrulina E.A., Poroshina N.V., Perminova A.A., Malyshkina E.E. Classification and properties of soils formed on reclaimed coal dumps of the Kizel coal basin // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 180–187 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-180-187
26. U.S. Geological Survey [Internet resource] <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed: 15.05.2024).

Проточно-инжекционное ионометрическое определение фторидов в биологических объектах с применением автоматической установки «Титрион»

© 2026. Д. Б. Петренко^{1,2}, к. х. н., доцент, А. В. Ерёмкина¹, студент, Н. В. Васильев¹, д. х. н., профессор, Е. В. Аристархова², аспирант,

¹Государственный университет просвещения,
105005, Россия, г. Москва, ул. Радио, д. 10а, стр. 2,
²Геологический институт Российской академии наук,
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7, стр. 1,
e-mail: aristarkhova_lisa@mail.ru

В статье представлена проточно-инжекционная методика определения фтора в биологических объектах с ионометрическим детектированием аналитического сигнала. Описаны возможности применения автоматического потенциометрического титратора «Титрион», позволяющего проводить управляемое дозирование раствора и регистрировать электродвижущую силу электродной системы для выполнения проточно-ионометрических измерений в комбинации со специально сконструированной измерительной ячейкой. Ячейка представляет собой смонтированный в едином пластиковом корпусе инжектор, позволяющий вводить пробу при помощи микрошприца, камеру смешивания, и камеры для рабочего электрода и электрода сравнения. Подобраны оптимальные условия выполнения измерений: скорость прохождения раствора через ячейку, параметры перемешивания пробы с буферным раствором, найден наиболее рациональный способ построения градуировочного графика. Успешно проведена апробация методики на стандартном образце состава фторапатита, а также образцах почечных камней и зубной эмали человека, раковины моллюска (*Viviparus viviparus* L.), переведённых в раствор обработкой соляной кислотой. Разработанная методика позволяет проводить экспрессное определение фтора в биологических объектах, используя малое количество исследуемого вещества (10–20 мг) с абсолютным пределом обнаружения 10 нг в объёме анализируемого раствора 1–25 мкл. Диапазон определения концентрации фторид-иона составил 30–500 нг в анализируемом объёме пробы. Относительная погрешность измерения для диапазона измеряемых концентраций не превышает $\pm 10\%$ отн. Предлагаемый подход к выполнению анализа перспективен для разработки методик микроопределения иодид-, нитрат-, хлорид- и других анионов в биологических пробах и объектах окружающей среды.

Ключевые слова: фториды, проточно-инжекционный анализ, биологические объекты, ионометрия.

Flow-injection ionometric fluorides detection in biological objects using automatic device “Titriion”

© 2026. D. B. Petrenko^{1,2}, ORCID: 0000-0003-0640-5159, A. V. Eremina¹,
N. V. Vasiliev¹, ORCID: 0000-0002-8215-6687, E. V. Aristarkhova^{1,2}, ORCID: 0009-0002-3826-9446

¹Federal State University of Education
bld. 2, 10a, Radio St., Moscow, Russia, 105005,
²Geological Institute, Russian Academy of Sciences,
1, 7, Pyzhevsky Lane, Moscow, Russia, 119017,
e-mail: aristarkhova_lisa@mail.ru

The paper presents a flow-injection technique for ionometric fluorine detection in biological objects. The possibilities of automatic potentiometric titrator “Titriion” application, which allows carrying out controlled dosing of the solution and registering the electromotive force of the electrode system to perform flow ionometric measurements in combination with a specially designed measuring cell, are described. The cell consists of a single plastic housing containing an injector for sample injection with a micro syringe, a mixing chamber, and chambers for the working electrode and reference electrode. The optimum conditions for measurements were selected: the rate of solution passage through the cell, the parameters of mixing the sample with buffer solution, the most rational way of plotting the calibration graph was found. The method of standard fluorapatite composition was successfully tested, as well as samples of kidney stones and tooth enamel from humans and mollusks (*Viviparus viviparus* L.) shells, transferred into solution by treatment with hydrochloric acid. The

developed technique allows carrying out fluorine express determination in biological objects using a small amount of the test substance (10–20 mg) with an absolute detection limit of 10 ng in 1–25 μ L of the analyzed solution. The range of fluoride ion concentration detection was 30–500 ng in the analyzed sample. The relative measurement error for the range of measured concentrations does not exceed ± 10 % rel. The proposed approach to the analysis is promising for the development of methods for iodide-, nitrate-, chloride- and other anions micro-detection in biological samples and environmental objects.

Keywords: fluorides, flow injection analysis, biological objects, ionometry.

Проблемы техногенного распространения соединений фтора и вопросы их действия на биологические системы постоянно находятся в центре внимания современной экологии, что нашло отражение в ряде обзорных работ последних лет [1, 2]. Основными источниками выбросов фторсодержащих соединений являются предприятия по выплавке алюминия [3, 4], производству силикатных материалов, добыча и переработка фосфорных [5] и редкометаллических руд [6], автомобильный транспорт [7].

Фтор является элементом с двойственной биологической ролью, неоптимальное поступление которого оказывает существенное негативное влияние на состояние организма человека. При недостатке фторидов возрастает риск возникновения кариеса. Избыточные количества фтора вызывают возникновение зубного и скелетного флюорозов [8], заболевания щитовидной железы [9], почек [10] и приводят к снижению умственных способностей у детей [11, 12], что обуславливает необходимость контроля его концентраций в зубной эмали [13], почечных камнях [14], тканях животных [15–17], слюне, крови и других биосубстратах при выполнении медико-биологических исследований.

Как показывает рассмотрение публикаций последних лет [18–21], для определения фтора в биологических объектах наиболее широкое применение получили ионометрические микрометоды, основанные на применении предложенного ещё в 1966 г. лантанфторидного электрода [22], благодаря своей доступности и надёжности. Наряду с ионометрией для анализа биообъектов находят применение ионная хроматография [23, 24] и капиллярный электрофорез [25].

Ионометрические микрометоды определения фтора можно разделить на две группы. Методы первой группы базируются на адаптации промышленно выпускаемых ионселективных электродов для выполнения измерений в микромасштабе. Известны методики микроопределения фторид-иона [26, 27], в которых 0,020–0,050 мл исследуемого раствора помещают между вертикально располо-

женными на одной оси фторид-селективным электродом и электродом сравнения либо погружают электроды в пробу, находящуюся в углублении специально изготовленной тефлоновой пластинки [28]. Описан ионометрический метод определения фторид-иона в пробах объёмом 0,050 мл с использованием двух виал, соединённых солевым мостиком, при этом фторид-селективный электрод помещают в виалу с пробой, а электрод сравнения – в виалу с буферным раствором [29]. Недостатками описанных методов являются неудобство применения в серийном анализе и риск механического повреждения мембраны электрода, что приводит к его выходу из строя.

Методы второй группы основаны на применении фторид-селективного электрода в качестве детектора в проточно-инжекционном анализе. Достоинствами проточно-инжекционных методов определения фторидов является их высокая экспрессность и возможность работы с малыми объёмами проб (0,005–0,010 мл) [30, 31]. Вместе с тем следует отметить, что применение проточно-инжекционных анализаторов в рутинном анализе биологических объектов весьма ограничено из-за отсутствия доступного стандартного оборудования, хотя в ряде работ и применены анализаторы заводского изготовления [32]. Установки для ионометрических измерений в потоке, предложенные в большинстве работ по определению фторидов, являются довольно сложными изделиями, сконструированными с применением узлов различных производителей (насос для подачи фонового раствора, блок регистрации) и нестандартного оборудования (система перемешивания образца, блок ввода пробы, детектор).

Настоящая работа посвящена разработке проточного ионометрического микрометода определения фтора в биологических объектах (твёрдых тканях организмов и их производных – зубной эмали и почечных камней животных, костей, раковин моллюсков) с использованием доступного оборудования и минимальным применением нестандартных деталей.

Материалы и методы исследования

Аппаратура. Для определения фторид-иона использовали электродную систему, состоящую из фторид-селективного электрода «ЭЛИТ-221» и вспомогательного хлорид-серебряного электрода «ЭВЛ-1М4». Регулирование скорости подачи раствора проводили с применением автоматического потенциометрического титратора «Титрион» производства ООО «Эконикс-Эксперт». Регистрацию потенциала фторидного электрода проводили с помощью рН-метра/иономера «Эксперт 001», входящего в состав титратора, с применением компьютерной программы регистрации данных «Эксперт 00х» (версия 26.03.2018). Высоты и площади пиков на кривых зависимостей электродвижущей силы (ЭДС) от времени или массы раствора, пропущенного через ячейку, определяли при помощи программы «CHROMuLAN» (версия 0.91). Для взятия навесок использовали весы аналитические «Pioneer PA214» («Ohaus», США) с точностью измерения $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ г.

Реагенты. В работе использовали реактивы марки «х.ч.». Растворы готовили на бидистиллированной воде. Рабочие растворы фторид-иона готовили разбавлением стандартного раствора фторида натрия, приготовленного по [33]. В растворе-носителе для измерений применяли буферный раствор состава (г/л): хлорид натрия (NaCl, х.ч.) – 5,85; цитрат натрия 3-замещённый 5,5-водный ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 5,5\text{H}_2\text{O}$, ч.д.а.) – 0,36; ацетат натрия 3-водный ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ч.д.а.) – 10,20; кислоту уксусную (CH_3COOH , х.ч.) – 1,50, представляющий собой буферный раствор (соответственно ГОСТ 4386-81), разбавленный в 10 раз. Для ввода пробы использовали микрошприц «SPEC 80208» объёмом 25 мкл («Hamilton», США). Для контроля правильности анализа использовали международный стандартный образец фторапатита SARM-32 («Mintek», ЮАР), содержащий $2,40 \pm 0,23$ % фтора. Макрокомпонентный состав образца (масс. %): P_2O_5 – 39,96; CaO – 54,44; CO_2 – 1,61; MgO – 0,50; SrO – 0,52; Fe_2O_3 – 0,14.

Обработку полученных данных осуществляли при помощи программы exp2pr.exe, входящей в стандартную комплектацию «Титриона». Данные сохраняли в виде текстового файла с расширением «.DAT», полученный файл открывали при помощи программы CHROMuLAN (версия 0.91), предназначенной для обработки хроматографических

данных, размечали границы пиков и в автоматическом режиме находили их высоты и площади. Построение градуировочных зависимостей в координатах «высота пика» и «площадь пика» проводили в программе MS Excel.

Результаты и обсуждение

Конструкция проточно-ионометрической установки. В настоящей работе предлагается использовать для выполнения проточно-ионометрических измерений автоматический потенциометрический титратор «Титрион» производства ООО «Эконикс-Эксперт» [34]. Титратор представляет собой модульную систему в виде расположенных на корпусе устройств, позволяющую проводить управляемое дозирование раствора из расположенного на весах стакана в ёмкость с анализируемым раствором, расположенную на магнитной мешалке, при помощи перистальтического насоса. Основную управляющую функцию выполняет иономер «Эксперт-001», разработанный специально для работы в составе автоматического титратора, к которому подключены весы, позволяющие контролировать расход раствора по убыли его массы в стакане, перистальтический насос и электродная система. Таким образом, титратор «Титрион» содержит все необходимые для проточно-ионометрических измерений узлы, за исключением ячейки для электродов.

Ячейка для электродов была сконструирована на основе технического решения, предложенного в работе [35] для проточного определения сульфид-иона. В отличие от прототипа, сконструированная нами ячейка имеет камеру для рабочего электрода диаметром 10 мм вместо полости, в которую помещается электрод в форме таблетки с осевым отверстием. Это позволяет использовать для выполнения измерений электроды заводского изготовления, которые при необходимости легко заменять. Ячейка представляет собой смонтированный в едином пластиковом корпусе инжектор, позволяющий вводить пробу при помощи микрошприца, камеру смешивания, и камеры для рабочего электрода и электрода сравнения (рис. 1).

Ячейку помещали на магнитную мешалку потенциометрической установки и при помощи перистальтического насоса подавали в неё буферный раствор (рис. 2).

Оптимизация условий изменения. Использование системы «Титрион» для проточно-

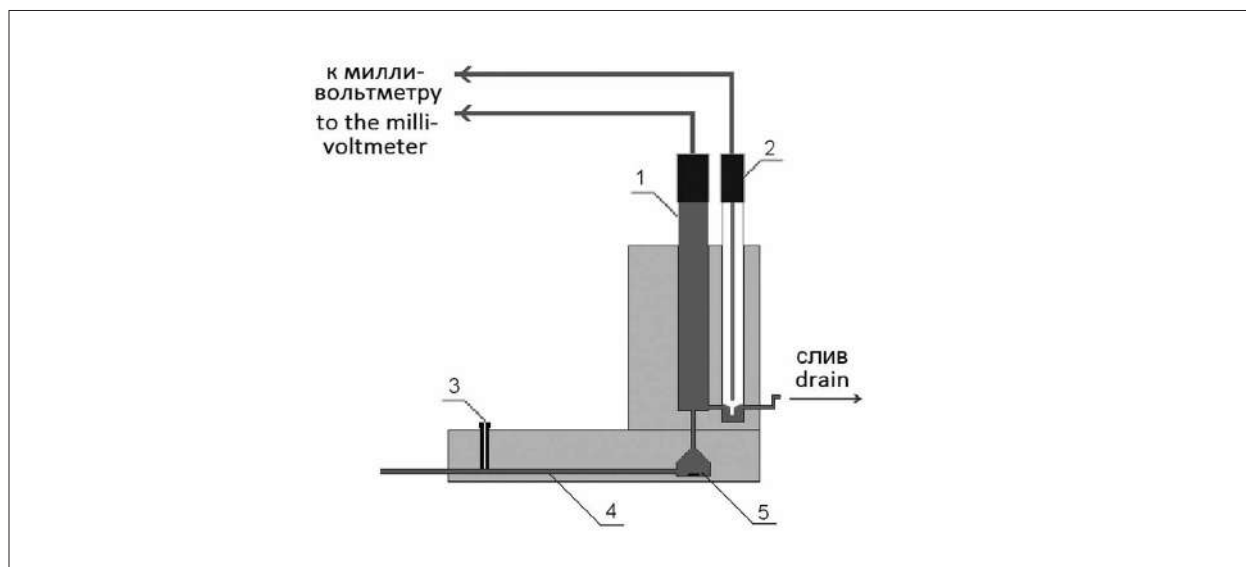


Рис. 1. Устройство ячейки для проточно-ионометрического определения фторид-иона.
1 – фторид-селективный электрод, 2 – хлорид-серебряный электрод сравнения, 3 – порт для ввода пробы, 4 – канал подачи раствора, 5 – камера смешивания с якорем магнитной мешалки
Fig. 1. Cell device for flow ionometric detection of fluoride ion.
1 – fluoride-selective electrode, 2 – silver chloride reference electrode, 3 – port for sample input, 4 – solution supply channel, 5 – mixing chamber with magnetic stirrer anchor

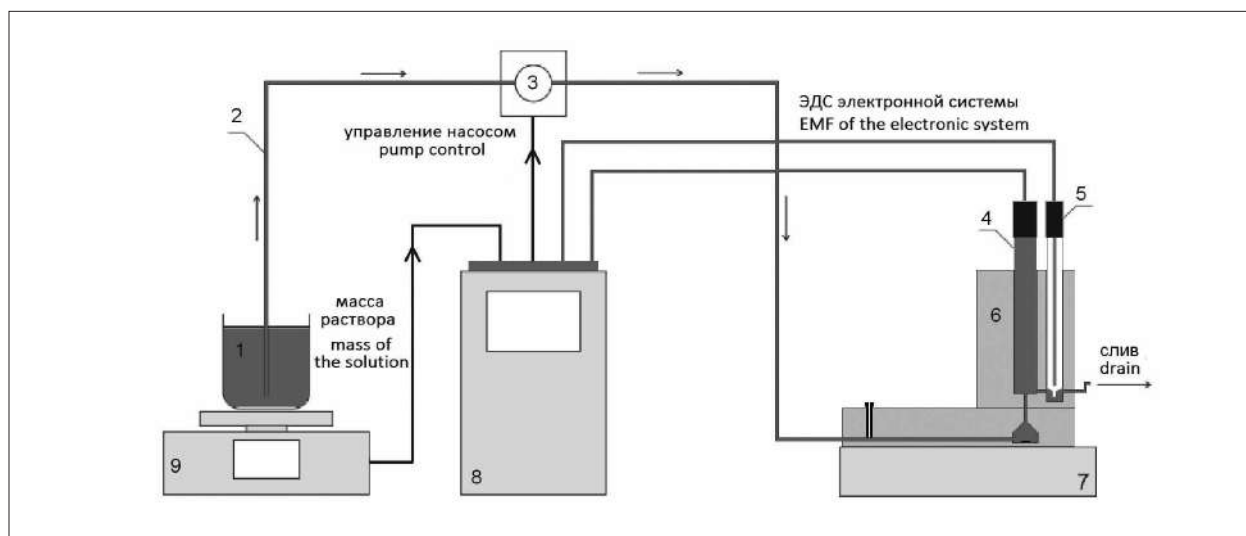


Рис. 2. Схема проточно-инжекционной системы для определения фторид-иона:
1 – стакан с буферным раствором, 2 – трубка насоса, 3 – перистальтический насос, 4 – фторид-селективный электрод, 5 – хлорид-серебряный электрод сравнения, 6 – проточная ячейка, 7 – магнитная мешалка, 8 – анализатор «Эксперт-001», 9 – весы
Fig. 2. Scheme of flow-injection system for fluoride ion detection.
1 – beaker with buffer solution, 2 – pump tube, 3 – peristaltic pump, 4 – fluoride-selective electrode, 5 – silver chloride reference electrode, 6 – flow cell, 7 – magnetic stirrer, 8 – analyzer “Expert-001”, 9 – scales

ионометрических измерений позволяет получать зависимости ЭДС электродной системы от времени (1) и от объёма раствора, прошедшего через измерительную ячейку (2), что позволяет использовать в качестве аналитического сигнала высоты и площади пиков на графиках зависимостей:

$$E = f(t) \quad (1),$$

$$E = f(V_{\text{раствора}}) \quad (2),$$

Форму аналитического сигнала при введении в ячейку различных количеств фторид-иона иллюстрируют рисунки 3 и 4.

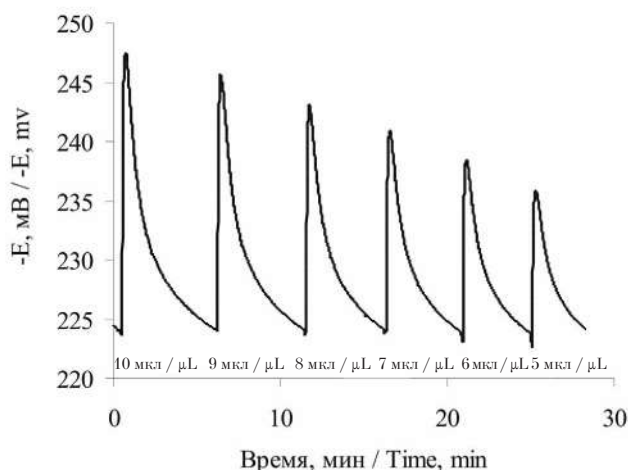


Рис. 3. Зависимость ЭДС электродной системы от времени при введении различных объёмов раствора с $c(F^-) = 20$ мг/л
Fig. 3. Time dependence of the electrode system EMF when injecting different volumes of solution with $c(F^-) = 20$ mg/L

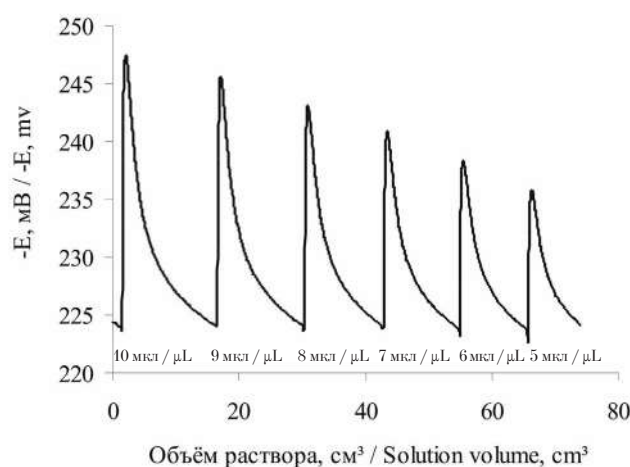


Рис. 4. Зависимость ЭДС электродной системы от объёма раствора, прошедшего через ячейку при введении различных объёмов раствора с $c(F^-) = 20$ мг/л
Fig. 4. Dependence of EMF of the electrode system on the volume of solution passed through the cell when injecting different volumes of solution with $c(F^-) = 20$ mg/L

В предварительных экспериментах установлено, что использование амплитуды пиков как аналитического сигнала приводит к меньшим погрешностям измерений, чем использование их площадей (R^2 составляет 0,992 и 0,985 соответственно), поэтому при построении градуировочных зависимостей использовали именно амплитуду.

Градуировочные зависимости для определения фторид-иона, полученные путём ввода в ячейку одинаковых объёмов (25 мкл) растворов с концентрацией фторид-иона 1–20 мг/л и путём ввода разных объёмов (2–25 мкл) раствора с концентрацией фторид-иона 20 мг/л

линейны и практически идентичны (рис. 5а, б). Таким образом, отсутствует необходимость приготовления серии градуировочных растворов, что позволяет повысить экспрессность анализа.

В проточной ячейке проводили измерения для различных скоростей подачи раствора (100, 150, 200 усл. ед.), которые задавали программно с помощью анализатора «Эксперт 001». Из рисунка 6 видно, что градуировочные графики линейны в диапазоне до содержаний фторид-иона 500 нг/25 мкл. Скорости пропускания раствора через ячейку 250 усл. ед. соответствует наибольший наклон градуи-

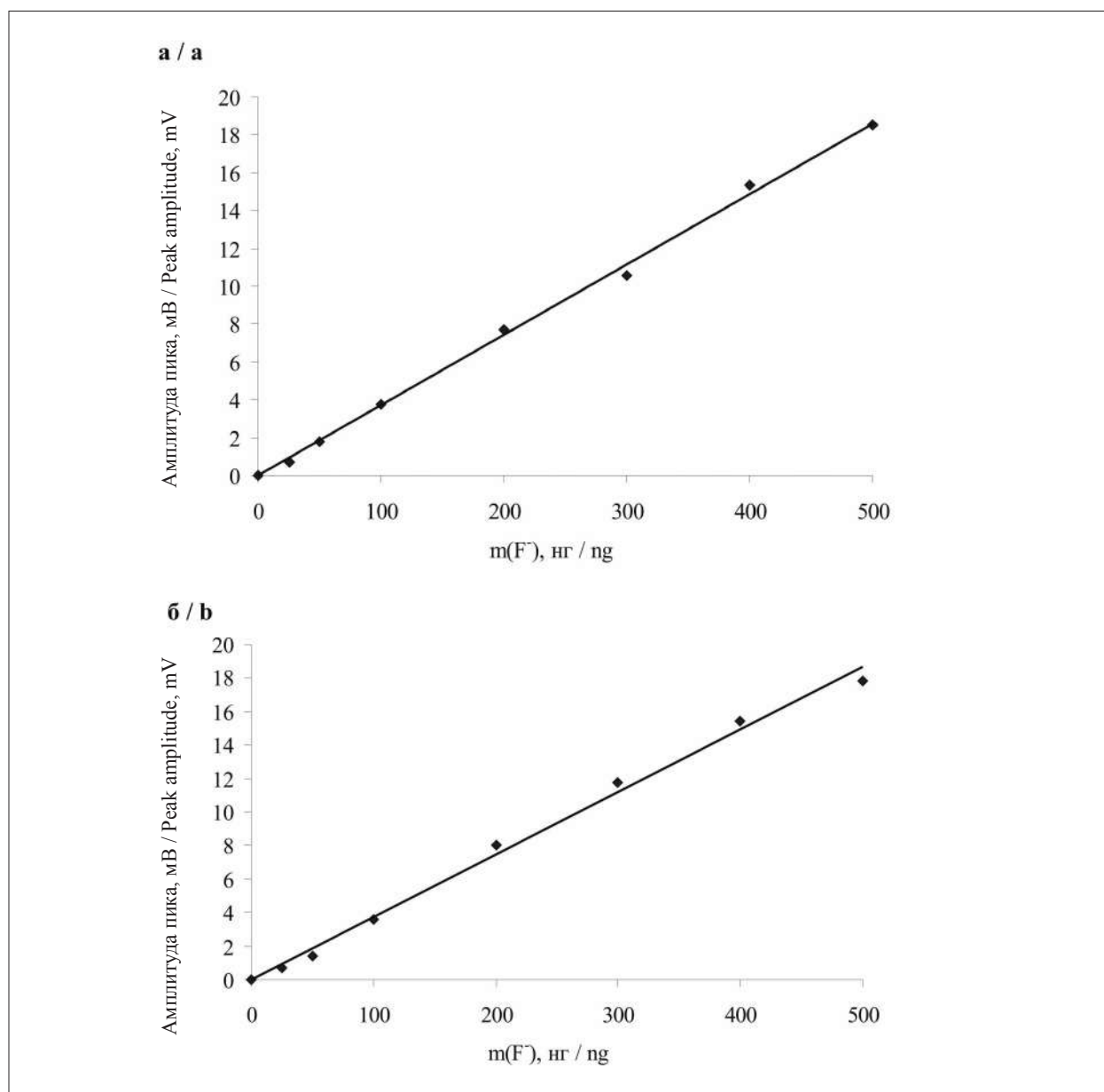


Рис. 5. Влияние способа введения градуировочного раствора на высоту пиков. Градуировка построена путём введения: а) растворов (25 мкл) с разной концентрацией фторид-иона; б) разных объёмов растворов (2,5–25 мкл) с концентрацией фторид-иона 20 мг/л

Fig. 5. Calibration dependence of fluoride ion content on peak amplitude. Graduation is constructed by injecting: a – solutions (25 µL) with different fluoride ion content, b – different volumes of solutions (2.5–25 µL) with fluoride ion content of 20 mg/L

ровочного графика, а, следовательно, и наибольшая чувствительность. Кроме того, при этой скорости время регистрации одного пика уменьшается с 4 до 1,5 мин.

Изучение влияния интенсивности перемешивания вводимой пробы с буферным раствором в смесительной камере ячейки показало, что наиболее воспроизводимые результаты наблюдаются при скоростях перемешивания 900–1200 об./мин. Определению фторид-иона не мешают, по крайней мере, 250-кратные концентрации ионов Ca^{2+} , Fe^{3+} и Al^{3+} , наличие

которых потенциально способно приводить к получению заниженных результатов определения фторид-иона за счёт образования мало-растворимых или устойчивых комплексных соединений.

Метрологические характеристики разрабатываемой методики. Предел обнаружения фторид-иона, рассчитанный по 3σ -критерию, составил 10 нг, а диапазон определения концентрации фторид-иона составил 30–500 нг в анализируемом объёме пробы (1–25 мкл). Относительная погрешность измерения для

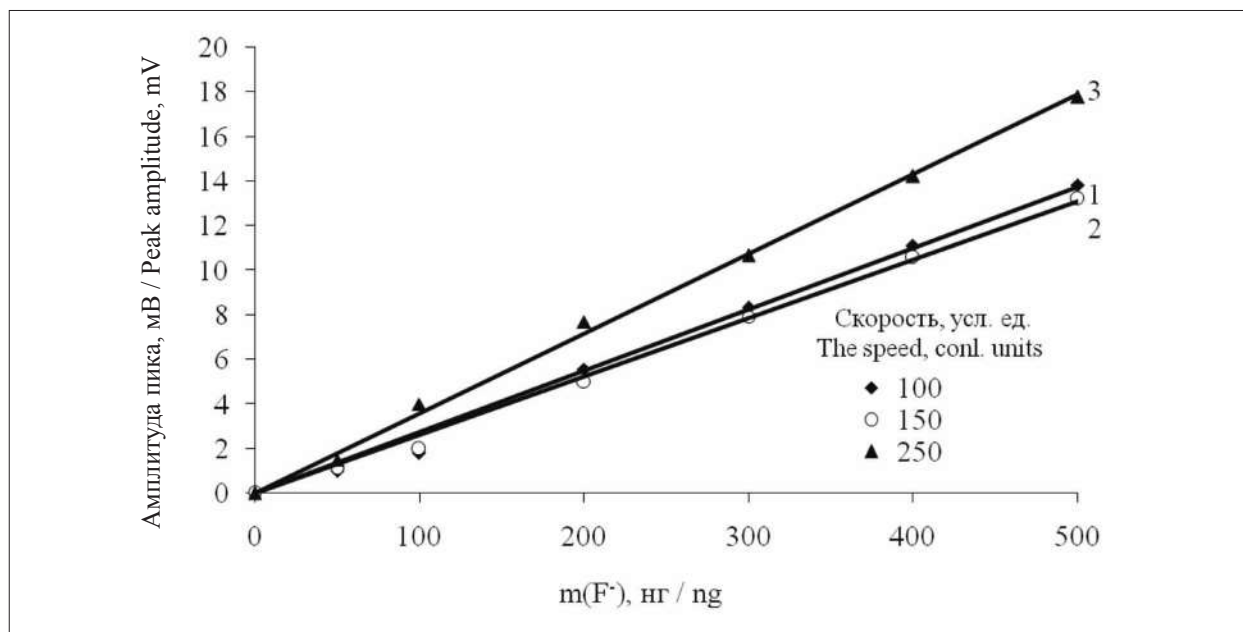


Рис. 6. Зависимость высот пиков от количества введенного фторид-иона при скоростях (усл. ед.) пропускания раствора через ячейку: 1) 100; 2) 150; 3) 250

Fig. 6. Dependence of peak heights on the amount of injected fluoride ion at different flow rates of the solution through the cell. Flow rate of the solution, conl. units: 1) 100; 2) 150; 3) 250

Таблица / Table

Результаты определения фтора в стандартном образце состава фторапатита и реальных биологических объектов (n = 5, P = 0,95) / Fluoride detection in a standard sample of fluorapatite composition and biological objects (n = 5, P = 0.95)

Проба / Sample	Содержание фтора, мг/кг Fluorine content, mg/kg
Стандартный образец SARM-32 (заявленное содержание фтора 24000 ± 2300 мг/кг) / SARM-32 standard sample (declared fluoride content 24,000 ± 2,300 mg/kg)	22800 ± 800
Зубная эмаль (проба 1) / Tooth enamel (sample 1)	1250 ± 150
Зубная эмаль (проба 1) + добавка стандартного раствора фторида 1000 мг/кг / Tooth enamel (sample 1) + addition of standard fluoride solution 1000 mg/kg	2300 ± 170
Зубная эмаль (проба 2) / Tooth enamel (sample 2)	2200 ± 210
Почечные камни (проба 1) / Kidney stones (sample 1)	< 100
Почечные камни (проба 2) / Kidney stones (sample 2)	900 ± 70
Почечные камни (проба 2) + добавка стандартного раствора фторида 1000 мг/кг / Kidney stones (sample 2) + addition of standard fluoride solution 1000 mg/kg	1920 ± 120
Раковина моллюска <i>Viviparus viviparus</i> L. <i>Viviparus viviparus</i> L. shell	2700 ± 250
Раковина моллюска <i>V. viviparus</i> + добавка стандартного раствора фторида 1000 мг/кг / <i>V. viviparus</i> shell + addition of standard fluoride solution 1000 mg/kg	3800 ± 310

диапазона измеряемых концентраций не превышает ±10 % отн.

Апробация методики на реальных объектах. Методика испытана на стандартном образце состава фторапатита SARM-32, а также реальных образцах почечных камней, зубной эмали человека и раковины моллюска

Viviparus viviparus L. Для перевода в раствор навеску образца массой 10–20 мг, взвешенную с точностью ±0,2 мг растворяли в пластиковой пробирке при комнатной температуре в 0,20 мл концентрированной соляной кислоты, доводили буферным раствором до определённого объёма (1–25 мл в зависимости от содер-

жания фтора) и вводили аликвотную часть полученного образца в проточную систему. Для увеличения точности приготовления малых объемов растворов их разведение выполняли гравиметрическим методом. Результаты представлены в таблице.

Представленные данные (табл.) демонстрируют высокую точность определения фтора в различных биологических матрицах, что подтверждается анализом международного стандартного образца фторопатита SARM-32 (аттестовано 24000 ± 2300 мг/кг фтора, получено 22800 ± 800 мг/кг фтора) и результатом анализа твердых тканей организмов и их производных методом добавок. Относительная погрешность измерения для диапазона измеряемых концентраций не превышает $\pm 10\%$ отн.

Одной из возможных областей применения предложенного в настоящей работе проточно-ионометрического метода определения содержания фторид-иона является его использование при анализе широкого диапазона биологических объектов и объектов окружающей среды – горных пород, руд, а также объектов, расположенных вблизи источников фторидного загрязнения (почвы, донные отложения, растения).

Заключение

В результате проведенных исследований предложен подход, позволяющий с применением серийно выпускаемого потенциометрического титратора «Титрион» и специальной ячейки проводить проточно-инжекционное определение фторид-иона с ионометрическим детектированием в биологических объектах. Область применения предлагаемого подхода к выполнению проточно-ионометрических измерений не ограничивается определением фторид-иона. Аналогичный подход, по всей видимости, может оказаться полезен для микроопределения и других ионов – иодидов, нитратов, хлоридов и др. Разработанная методика позволяет проводить экспрессное определение фтора в биологических объектах, используя малое количество исследуемого вещества ($10\text{--}20$ мг) с абсолютным пределом обнаружения 10 нг в анализируемом объеме пробы ($1\text{--}25$ мкл).

Авторы выражают глубокую признательность за поддержку и ценные консультации к.х.н. Надежде Валентиновне Корсаковой (ГЕОХИ РАН).

Исследование выполнено в рамках реализации государственного задания Министерства просве-

щения Российской Федерации (KFRF-2026-0026; рег. № 1025112100002-1-5.3.1; Тема: «Научно-методическое обоснование совершенствования системы подготовки педагогических кадров по профилям математика, физика, химия, биология, география в вузах Министерства просвещения в условиях интеграции науки и образования»).

References

1. Gornostaeva E.A., Fuks S.L. The effect of fluorinated compounds on living organisms (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 1. P. 14–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-014-024
2. Kozvonin V.A., Kutayavina T.I., Ashikhmina T.Ya. Perfluorocarbon compounds as potential environmental and human health risks: a review // Theoretical and Applied Ecology. 2025. No. 2. P. 6–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-006-015
3. Nikiforova V.A., Vardanyan M.A., Lapina S.F. Chemical and ecological-biological characteristics of fluorine in the environment // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki. 2021. V. 1. P. 245–250 (in Russian).
4. Evdokimova G.A., Mozgova N.P. Comparative estimation of soil and plant pollution in the impact area of air emissions from an aluminium plant after technogenic load reduction // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No. 4. P. 64–68 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-4-064-068
5. Lieberman R.N., Izquierdo M., Córdoba P., Palmerola N.M., Querol X., de la Campa A.M.S., Font O., Cohen H., Knop Y., Torres-Sánchez R., Sánchez-Rodas D., Muñoz-Quiros C., de la Rosa J. The geochemical evolution of brines from phosphogypsum deposits in Huelva (SW Spain) and its environmental implications // Sci. Total Environ. 2020. V. 700. Article No. 134444. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134444
6. Krasavtseva E.A., Kaganovich N.I. Geoecological assessment of fluorine contamination of environmental components in the zone of influence of an abandoned rare-metal mine in the Murmansk region // Ecology and Industry of Russia. 2024. V. 28. No. 10. P. 66–71 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2024-10-66-71
7. Petrenko D.B., Korsakova N.V., Vasiliev N.V. Accumulation of fluorine-containing compounds in soils of roadside territories in the Moscow Region // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 1. P. 52–59 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-052-059
8. Agalakova N.I., Gusev G.P. Effect of inorganic fluorine on living organisms of different phylogenetic level // J. Evol. Biochem. Phys. 2011. V. 47. No. 5. P. 393–406. doi: 10.1134/S002209301105001X
9. Barberio A.M., Hosein F.S., Quiñonez C., McLaren L. Fluoride exposure and indicators of thyroid functioning in the Canadian population: implications for community water fluoridation // J. Epidemiol. Commun. Health. 2017. V. 71. No. 10. P. 1019–1025. doi: 10.1136/jech-2017-209129

10. Jiménez-Córdova M.I., Cárdenas-González M., Aguilar-Madrid G., Sanchez-Peña L.C., Barrera-Hernández Á., Domínguez-Guerrero I.A., González-Horta C., Barbier O.C., Del Razo L.M. Evaluation of kidney injury biomarkers in an adult Mexican population environmentally exposed to fluoride and low arsenic levels // *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2018. V. 352. P. 97–106. doi: 10.1016/j.taap.2018.05.027
11. Tang Q.Q., Du J., Ma H.H., Jiang S.J., Zhou X.J. Fluoride and children's intelligence: a meta-analysis // *Biol. Trace Elem. Res.* 2008. V. 126. P. 115–120. doi: 10.1007/s12011-008-8204-x
12. Trivedi M.H., Verma R.J., Chinoy N.J., Patel R.S., Sathawara N.G. Effect of high fluoride water on intelligence of school children in India // *Fluoride.* 2007. V. 40. No. 3. P. 178–183.
13. Carvalho M.L., Karydas A.G., Casaca C., Zarkadas C., Paradellis T., Kokkoris M., Nsouli B., Chinha A.S. Fluorine determination in human healthy and carious teeth using the PIGE technique // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 2001. V. 179. No. 4. P. 561–567. doi: 10.1016/S0168-583X(01)00684-X
14. Hering F., Briellmann T., Seiler H., Rutishauser G. Fluoridation of drinking water: Effects on kidney stone formation // *Urol. Res.* 1985. V. 13. No. 4. P. 175–178. doi: 10.1007/BF00261819
15. Kierdorf U., Kierdorf H. Temporal variation of fluoride concentration in antlers of roe deer (*Capreolus capreolus*) living in an area exposed to emissions from iron and steel industry, 1948–2000 // *Chemosphere.* 2003. V. 52. No. 10. P. 1677–1681. doi: 10.1016/S0045-6535(03)00443-0
16. Droganova T.S., Polikarpova L.V., Petrenko D.B., Vasilev N.V. Acid phosphatase activity in the hepar of a river snail (*Viviparus viviparus*) under the influence of fluoride ion // *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Natural sciences.* 2014. No. 5. P. 14–19 (in Russian).
17. Palczewska-Komsa M., Kalisińska E., Kosik-Bogacka D.I., Łanocha N., Budis H., Baranowska-Bosiacka I., Gutowska I., Chlubek D. Fluoride accumulation in dog bones // *Fluoride.* 2014. V. 47. No. 2. P. 98–108.
18. Jáudenes-Marrero J.R., Paz-Montelongo S., Hardisson A., Rubio C., Cerdán-Pérez S., Gutiérrez-Fernández Á.J. Fluoride exposure from consumption of some animal-based foods in an outermost region of Europe // *J. Food Compos. Anal.* 2024. V. 133. Article No. 106395. doi: 10.1016/j.jfca.2024.106395
19. Yokoyama Y., Kano K., Kondo Y., Miyahara Y., Miyazaki K., Abe T. Fluoride ion-selective electrode for organic solutions // *Anal. Chem.* 2021. V. 93. No. 45. P. 15058–15062. doi: 10.1021/acs.analchem.1c03064
20. Mondal N.K. Diagnosis of fluorosis by analysis of fluoride content in body fluids using ion selective electrode method // *Adv. Exp. Med. Biol.* 2021. V. 1306. P. 121–127. doi: 10.1007/978-3-030-63908-2_9
21. Zhang C., Aarts M.G.M., van der Ent A. A simple and low-cost method for fluoride analysis of plant materials using alkali extraction and ion-selective electrode // *Plant Methods.* 2025. V. 21. No. 1. Article No. 98. doi: 10.1186/s13007-025-01412-6
22. Frant M.S., Ross J.W.Jr. Electrode for sensing fluoride ion activity in solution // *Science.* 1966. V. 154. No. 3756. P. 1553–1555. doi: 10.1126/science.154.3756.1553
23. Yusenko E.V., Kapsargin F.P., Nesterenko P.N. Determination of fluoride ions in urinary stones by ion chromatography // *J. Anal. Chem.* 2014. V. 69. No. 5. P. 474–479. doi: 10.1134/S1061934814050128
24. Hu K.K., Huang W., Su Y.H., Hu R.Z. Simultaneous determination of fluorine and iodine in urine by ion chromatography with electrochemical pretreatment // *Chin. Chem. Lett.* 2009. V. 20. No. 12. P. 1483–1486. doi: 10.1016/j.cclet.2009.05.030
25. Guimarães I.C., Rezende C.C., Fracassi da Silva J.A., Pereira de Jesus D. Simultaneous determination of free fluoride and monofluorophosphate in toothpaste by capillary electrophoresis with capacitively coupled contactless conductivity detection // *Talanta.* 2009. V. 78. No. 4–5. P. 1436–1439. doi: 10.1016/j.talanta.2009.02.041
26. Durst K.A., Taylor J.R. Modification of the fluoride activity electrode for microchemical analysis // *Anal. Chem.* 1967. V. 39. No. 12. P. 1483–1485. doi: 10.1021/ac60256a033
27. Brambilla E., Felloni A., Fadini B.L., Strohmenger C.L. A simplified micromethod for fluoride analysis // *Arch. Oral Biol.* 1998. V. 43. No. 10. P. 819–823. doi: 10.1016/S0003-9969(98)00060-0
28. Tyler J.E., Poole D.F. The rapid measurement of fluoride concentrations in stored human saliva by means of a differential electrode cell // *Arch. Oral Biol.* 1989. V. 34. No. 12. P. 995–998. doi: 10.1016/0003-9969(89)90058-7
29. Petrenko D.B., Dmitrieva V.Yu., Gazarov R.A., Vasil'ev N.V. Potentiometric micromethod for the determination of fluoride ion in natural objects // *Fluorine Notes.* 2018. V. 3 (118). Article No. 1–2. doi: 10.17677/fn20714807.2018.03.01
30. Hara H., Yabuuchi K., Higashida M., Ogawa M. Determination of free and total fluoride in rain water using a continuous-flow system equipped with a fluoride ion-selective electrode detector // *Anal. Chem. Acta.* 1998. V. 364. No. 1–3. P. 117–123. doi: 10.1016/S0003-2670(98)00169-X
31. Santos J.R., Lapa R.A., Lima J.L. Development of a tubular fluoride potentiometric detector for flow analysis: evaluation and analytical applications // *Anal. Chem. Acta.* 2007. V. 583. No. 2. P. 429–436. doi: 10.1016/j.aca.2006.10.020
32. Flow chemical analysis // *Problems of analytical chemistry* / Ed. Yu.A. Zolotov. Moskva: Nauka, 2014. 428 p. (in Russian).
33. Korostelev P.P. Preparation of solutions for chemical-analytical works. Moskva: Nauka, 1964. 398 p. (in Russian).
34. Orlitskaya A.O., Shorin S.V., Zaitsev N.K., Yuritsyn V.V. Application of the automatic weighing titrator "Titron" for the analysis of tap water // *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie.* 2013. No. 5. P. 16–20 (in Russian).
35. Korsakova N.V., Kokina T.A., Sushchevskaya T.M., Varshal G.M. Potentiometric determination of sulfide sulfur in solutions filling inclusions in minerals // *Geokhimiya.* 1991. V. 29. No. 1. P. 46–56 (in Russian).

Инверсионно-вольтамперометрическое определение антиоксидантов по степени снижения площади пика пероксида водорода

© 2026. А. И. Фокина, к. б. н., доцент, М. А. Зайцев, к. п. н., доцент, С. С. Козачок, студент, М. Ю. Кухно, студент, Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36, e-mail: annushka-fokina@mail.ru

В настоящее время теория окислительного стресса является ключевой при объяснении механизмов негативного влияния различных экологических факторов на здоровье человека. В связи с этим возник интерес к изучению антиоксидантных свойств различных продуктов питания, биологически активных добавок и лекарственных препаратов. При этом в центре внимания оказалось растительное сырьё и продукты на его основе. На территории Кировской области произрастают растения, давно зарекомендовавшие себя как источники ценных биологически активных соединений, в том числе обладающих антиоксидантными свойствами. К этим растениям относятся различные виды семейства хвойных и облепиха. С учётом природы анализа, приоритетного внимания заслуживают электрохимические методы, в том числе метод инверсионной вольтамперометрии. Он позволяет смоделировать условия, приближающиеся к среде организма. Целью работы было – исследовать возможность определения антиоксидантов (АО) в среде фосфатного буферного раствора ($\text{pH} = 6,8$) в присутствии пероксида водорода на дисковом вращающемся электроде. Установлены метрологические характеристики методики определения АО в этанольных растворах методом стандартов по степени снижения пика пероксида водорода на вольтамперограмме после добавления АО. Полученные данные и предложенные методические подходы могут быть полезны в экологических исследованиях антиоксидантной активности различных растительных объектов и трактовке результатов, так как позволяют судить и о ценности сырья как источника АО, и о влиянии различных факторов на состояние растений.

Ключевые слова: антиоксиданты, полифенолы, инверсионная вольтамперометрия, экстракты, хвойные растения, облепиха.

Stripping voltammetric detection of antioxidants by the degree of reduction in the peak area of hydrogen peroxide

© 2026. A. I. Fokina ORCID: 0000-0001-8265-8882, M. A. Zaitsev ORCID: 0000-0001-8726-6714, S. S. Kozachok ORCID: 0009-0003-3257-4885, M. Yu. Kukhno ORCID: 0009-0008-4160-4376, Vyatka State University, 36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000, e-mail: annushka-fokina@mail.ru

Currently the oxidative stress theory is a key to explaining the mechanisms of negative environmental impacts on human health. This led to growing interest in studying the antioxidant properties of various food products, dietary supplements, and pharmaceuticals. Plant-based materials and products are of particular focus. Plants that have long established themselves as sources of valuable biologically active compounds, including those with antioxidant properties, grow on the territory of the Kirov Oblast. Such plants include various species of conifers and *Hippophae rhamnoides* L. Electrochemical methods, particularly stripping voltammetry deserve priority attention as they allow simulation of conditions close to those in a living organism. The aim of this work was to study the possibility of detecting antioxidants (AOs) in a phosphate buffer solution ($\text{pH} = 6.8$) in the presence of hydrogen peroxide using a rotating disk electrode. The metrological characteristics of the method for AOs detecting in ethanol solutions were established by the standard addition method based on the degree of reduction of the hydrogen peroxide peak on the voltammogram after AOs addition. The obtained data and proposed methodological approaches can be useful in environmental studies of the antioxidant activity of various plant objects and in the interpretation of results, since they allow to assess both the value of the raw material as a source of AOs and various factors affecting the plants state.

Keywords: antioxidants, polyphenols, stripping voltammetry, extracts, coniferous plants, *Hippophae rhamnoides* L.

В физиологических условиях свободно-радикальное окисление (СРО) и перекисное окисление липидов (ПОЛ) необходимо для нормального функционирования клеток. Скорость данных процессов поддерживается существующими системами антиоксидантной защиты [1–3]. По современным данным, в условиях чрезмерного и несбалансированного образования активных форм кислорода (АФК) СРО становится одним из главных механизмов повреждения клеток организма [4]. Согласно ведущей теории, объясняющей механизм неблагоприятного влияния на организм человека различных факторов, в том числе экологических, причиной нарушений является окислительный стресс в организме, вызванный чрезмерным появлением АФК [5–7]. Антиоксиданты взаимодействуют со свободными радикалами (СР) и блокируют их эффекты [8]. Снизить уровень окислительного стресса в организме позволяют антиоксиданты (АО) как эндогенной, так и экзогенной природы [9]. На территории Кировской области произрастают различные виды растений, которые являются богатыми источниками АО полифенольной природы [10–11]. Контроль количества АО необходим не только для нормирования потребления продукции, содержащей данную группу веществ, но и для изучения влияния техногенной нагрузки на состав растительных объектов, в том числе лекарственного растительного сырья.

Существует множество методик определения АО, при этом вопрос нормирования их суммарного количества и метода определения остаётся открытым [12–15]. Благодаря сходству природы формирования аналитического сигнала с процессами в организме (процессы взаимодействия оксидантов и антиоксидантов сопровождаются передачей электронов) электрохимические методы занимают особое место среди методов изучения антиоксидантных свойств. Кроме того, они позволяют работать с окрашенными и мутными растворами без предварительной пробоподготовки и отличаются высокой чувствительностью и экспрессностью [14].

Метод инверсионной вольтамперометрии позволяет регистрировать силу токов, возникающих при электровосстановлении различных форм кислорода, в том числе такой его активной формы, как пероксид водорода. С аналитической точки зрения пероксид водорода доступен, достаточно стабилен, и при этом исследования с его участием актуальны. Интерес именно к пероксиду водорода, как

к биологически активному промежуточному соединению, обусловлен следующими причинами: пероксид водорода – продукт дисмутации супероксидного радикала; при взаимодействии с ионами металлов с переменной валентностью он обладает способностью генерировать высоко реакционно-активные свободные гидроксильные радикалы; H_2O_2 способен сравнительно легко диффундировать сквозь гидрофобные мембраны и с этим связывается его биологическая активность. В основе этого феномена лежит то, что молекула пероксида водорода неионизирована и имеет слабый заряд. Следует подчеркнуть, что важность этой молекулы связана не с её химической реакционной способностью, а с теми цитотоксическими эффектами агрессивных свободных радикалов (например, $\bullet OH$), которые из неё генерируются [1].

Целью работы было – исследовать возможность определения антиоксидантов в экстрактах из растений в среде фосфатного буферного раствора (рН 6,8) в присутствии пероксида водорода на дисковом вращающемся электроде.

Объекты и методы исследования

В работе использовали метод инверсионной вольтамперометрии. Определение проведено на приборе марки «Экотест-ВА» с модулем «ЕМ-04» (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия).

Объём раствора в электрохимической ячейке составлял 25,0 см³. Использовали стандартные растворы пероксида водорода ($C = 4,8\text{--}5,3$ мг/см³), кверцетина, аскорбиновой и галловой кислот (1 мг/см³). Номинальными объёмами (100%) считали: экстракты растений – 0,8 см³, стандартные растворы АО – 0,8 см³, пероксида водорода – 0,4 или 0,8 см³.

Методика предполагает предварительное накопление тончайшей ртутной плёнки на дисковом вращающемся электроде из раствора нитрата ртути (II). Далее в ячейку заливают последовательно 25 см³ фосфатного буферного раствора с рН 6,8 (фоновый раствор), аликвоту стандартного раствора водорода, аликвоту стандарта АО или исследуемого экстракта, снимая при каждом добавлении вольтамперограмму. По степени занижения пика электровосстановления пероксида водорода можно вычислить количество пероксида, ушедшего на реакцию с антиоксидантом (мг H_2O_2 /см³ экстракта или мг H_2O_2 /г исследуемого сырья) или представить количество АО в единице

сырья или экстракта из него в пересчёте на стандарт (мг стандарта/см³ экстракта или мг стандарта/г сырья).

Предварительно устанавливали линейную зависимость между площадью пика на вольтамперограмме и концентрацией пероксида водорода в ячейке, а также влияние различных АО на площадь пика пероксида водорода.

Для оценки пригодности вольтамперометрического определения АО в различных экстрактах устанавливали метрологические характеристики результатов ($P = 0,95$): повторяемость ($n = 3$ минимум на пяти уровнях концентрации или $n = 6$ на одном уровне концентрации), линейность (пять уровней концентрации создавали варьированием объёма аликвот растворов экстрактов), правильность (добавляли известное количество стандарта совместно с экстрактом (метод «введено-найден»)). В качестве критерия приемлемости линейности ориентировались на значение $R \geq 0,99$, для оценки повторяемости использовали величины аналогичной характеристики при определении органических веществ методом катодной инверсионной вольтамперометрии на данном приборе.

Использованы экстракты из хвои пихты сибирской (*Abies sibirica* L.), корейской (*Abies koreana* W.), псевдотсуги Мензиса (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), листьев и плодов облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.), отобранных на территории Кировской области летом 2025 г. Образцы хвои, листьев и плодов собраны на территории д. Сергеево вблизи г. Киров (Кировская область).

Этанольные экстракты приготовлены по ОФС.1.5.3.0006 (однократная экстракция) с помощью 70 % раствора этилового спирта. На экстрактах из хвои пихты сибирской, листьев и ягод облепихи определяли такие метрологические характеристики, как линейность (зависимость между площадью пика электровосстановления пероксида водорода и объёмом добавляемого экстракта, $P = 0,95$; $n = 3$ на пяти уровнях величин аликвот экстрактов: от 0,4 см³ до 1,2 см³ при 0,17 мг Н₂О₂/см³), повторяемость результатов (СКО, %) и открываемость (%) методом «введено-найден».

Статистическую обработку результатов всех измерений проводили согласно ГОСТ Р 8.736-2011. Статистическую значимость различий между средними значениями устанавливали при $P < 0,05$. В качестве погрешностей использованы среднеквадратичные отклонения.

Результаты и обсуждение

Электрохимические параметры работы на приборе и антиоксидантные свойства стандартных веществ. Установлено, что при развёртке потенциала в диапазоне от +200 до -1700 мВ, продолжительности накопления 60 с и потенциале накопления равном 0 мВ, удаётся получить закономерное увеличение площади пика на вольтамперограмме при повышении концентрации пероксида водорода в диапазоне от 0,02 мг/см³ до 0,2 мг/см³ ($r = 0,99$). Пик электровосстановления пероксида водорода регистрируется в области потенциалов минус (1200 ± 100) мВ.

При внесении стандартных растворов АО (кверцетин, аскорбиновая и галловая кислоты) происходит снижение пика электровосстановления Н₂О₂ на вольтамперограмме, которое возрастает при увеличении количеств вносимых АО ($r = -0,99$). При этом степень снижения зависит от природы АО: в большей степени занижает площадь пика введение (при равных условиях эксперимента) кверцетина, далее следует галловая и аскорбиновая кислоты. Кверцетин проявляет антиоксидантные свойства в большей степени, чем остальные АО, в пять раз больше снижает концентрацию пероксида в растворе, чем галловая кислота и в шесть раз больше, чем аскорбиновая. Высокая антиоксидантная активность кверцетина обусловлена положением гидроксильных групп и двойных связей в кольце [16].

Расхождение результатов, характеризующееся повторяемостью (СКО), колеблется от 3,5 до 11,7 % (табл. 1).

Однако добавление недостаточных количеств АО полифенольной природы приводит к прооксидантному действию, что проявляется в увеличении площади пика пероксида водорода на вольтамперограмме. В литературе [16] есть сведения о том, что в зависимости от концентрации и природы полифенолов, а также окислительно-восстановительного статуса клетки эти соединения, как и другие антиоксиданты, при аутоокислении могут образовывать Н₂О₂ и другие АФК. В нашем исследовании данное явление не изучалось, однако отмечен указанный эффект при введении в раствор, содержащий пероксид водорода экстрактов растений, галловой кислоты и кверцетина. Следует увеличить аликвоту раствора, испытываемого на антиоксидантные свойства, для подавления прооксидантного эффекта.

Таблица 1 / Table 1

Метрологические характеристики определения антиоксидантов
Metrological characteristics for the antioxidants detection

Вещество / Substance	Повторяемость (СКО, %) Repeatability (RSD, %)	Линейность Linearity (R)
Кверцетин / Quercetin	8,1	0,99
Галловая кислота / Gallic acid	3,5	
Аскорбиновая кислота / Ascorbic acid	11,7	

Таблица 2 / Table 2

Метрологические характеристики результатов определения антиоксидантных свойств
в экстрактах из растений методом инверсионной вольтамперометрии (стандарт – кверцетин)
Metrological characteristics of detecting the antioxidant properties
of plant raw material by stripping voltammetry (standard – quercetin)

Объект / Object	Линейность (R) Linearity (R)	Повторяемость (СКО, %) Repeatability (RSD, %)	Открываемость Open rate, %
Хвоя пихты сибирской <i>Abies sibirica</i> L. needles	0,99	4,0	99,0
Листья облепихи <i>Hippophae rhamnoides</i> L. leaves	1,00	8,6	92,3
Ягоды облепихи <i>H. rhamnoides</i> berries	1,00	9,5	87,5

Таблица 3 / Table 3

Содержание антиоксидантов (АО) в образцах хвои / Antioxidant (AO) content in fir needle samples

Объект Object	Суммарное содержание АО, мг/г AO total content, mg/g		Содержание полифенолов (в пересчёте на галловую кислоту), мг/г / Polyphenol total content (in terms of gallic acid), mg/g	R
	в пересчёте на галловую кислоту / in terms of gallic acid	в пересчёте на кверцетин / in terms of quercetin		
<i>A. sibirica</i>	168,9 ± 1,8	33,8 ± 0,4	32,3 ± 2,0	0,95
<i>A. koreana</i>	189,0 ± 10,0	37,8 ± 2,0	47,2 ± 2,8	
<i>P. menziesii</i>	567 ± 29	113 ± 6	73,8 ± 1,1	

Полученные данные позволили далее применить методику для определения АО в растительных экстрактах.

Метрологические характеристики результатов определения антиоксидантов в экстрактах растений. Согласно полученным данным методика валидна для определения АО в пересчёте на кверцетин как для экстрактов облепихи, так и для экстрактов пихты сибирской (табл. 2).

Установлена взаимосвязь величин содержания АО полифенольной природы в образцах хвои (определены спектрофотометрически с реактивом Фолина – Чокальтеу при $\lambda = 765$ нм) и суммой АО (определены методом ИВА) (табл. 3).

Максимальное количество суммы АО и АО полифенольной природы содержат образцы псевдотсуги Мензиса, минимальное – пихты сибирской, при этом величины сопоставимы с аналогичными для пихты белой (*Abies alba* Mill.), образцы хвои которой были со-

браны в Южных Карпатах (Румыния) в 2020 г. [17]. Именно данному классу соединений отводится роль в антимикробной активности, доказано, что экстракты с данными соединениями обладают антибактериальным эффектом.

В ягодах облепихи (в пересчёте на абсолютно сухое вещество) содержание АО (по кверцетину) составило $66,2 \pm 4,1$ мг/г, листьях – $38,6 \pm 1,6$ мг/г. Таким образом, из ягод экстрагируются АО, определяемые методом ИВА, больше, чем из хвои пихты корейской и сибирской, но почти в два раза меньше, чем из хвои псевдотсуги. Содержание суммы АО в листьях облепихи сопоставимо с аналогичным показателем для хвои пихт сибирской и корейской.

Заключение

Получен положительный опыт использования усовершенствованной методики инверсионно-вольтамперометрического определения АО в водно-спиртовых экстрак-

тах облепихи и хвой пихт в среде фосфатного буферного раствора с рН 6,8 с добавлением пероксида водорода в качестве модели активной формы кислорода. В качестве аналитической характеристики использована величина снижения площади пика электровосстановления пероксида водорода. Метод позволяет получать воспроизводимые результаты для растворов, хорошо смешивающихся с водой и представлять результаты, как в пересчёте на какой-либо стандарт АО, так и в эквивалентных объёмах изучаемых экстрактов на массу инактивируемого пероксида водорода. Таким образом, установлен чёткий алгоритм, позволяющий получать данные о содержании суммы АО в растительном сырье и, как следствие, оценивать ценность сырья и физиологическое состояние растений при мониторинговых исследованиях.

Литература

1. Узбеков М.Г. Перекисное окисление липидов и антиоксидантные системы при психических заболеваниях. Сообщение 1 // Социальная и клиническая психиатрия. 2014. Т. 24. № 4. С. 97–103.
2. Гаврилова О.А. Особенности процесса перекисного окисления липидов в норме и при некоторых патологических состояниях у детей (обзор литературы) // Acta Biomedica Scientifica. 2017. Т. 2. № 4. С. 15–22.
3. Головки Т.К., Силина Е.В., Лашманова Е.А., Козловская А.В. Активные формы кислорода и антиоксиданты в живых системах: интегрирующий обзор // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 17–26. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-017-026
4. Надеев А.Д., Зинченко В.П., Авдонин П.В., Гончаров Н.В. Токсические и сигнальные свойства активных форм кислорода // Токсикологический вестник. 2014. № 2. С. 22–27.
5. Абдурахманов Г.М., Гасангаджиева А.Г., Абдурахманова Э.Г., Магомедова А.Г. Состояние компонентов окружающей среды и заболеваемость злокачественными новообразованиями в Лакском районе республики Дагестан // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 4. С. 109–111.
6. Череватенко А.А. Экологические факторы риска для здоровья человека // Журнал фундаментальной медицины и биологии. 2018. № 3. С. 39–45.
7. Цейликман В.Э., Лукин А.А. Влияние окислительного стресса на здоровье человека // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 3–1 (117). С. 206–211. doi: 10.23670/IRJ.2022.117.3.037
8. Rom O., Aviram M. Endogenous or exogenous antioxidants vs. pro-oxidants in macrophage atherogenicity // Curr. Opin. Lipidol. 2016. V. 27. No. 2. P. 204–206. doi: 10.1097/MOL.0000000000000287

9. Kanwugu O.N., Glukhareva T.V., Danilova I.G., Kovaleva E.G. Natural antioxidants in diabetes treatment and management: prospects of astaxanthin // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2022. V. 62. No. 18. P. 5005–5028. doi: 10.1080/10408398.2021.1881434
10. Буркова В.Н., Сергун В.П., Иванов А.А. Химический состав и фармакологическая активность водного экстракта пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) // Химия растительного сырья. 2022. № 2. С. 19–34. doi: 10.14258/jcrpm.20220210469
11. Фокина А.И., Адамович Т.А., Трефилова Л.В. Подходы к определению антиоксидантов в пробах хвой различных представителей семейства сосновые // Химия растительного сырья. 2026. № 2. С. 255–262. doi: 10.14258/jcrpm.20260217651
12. Фокина А.И., Нилова А.Б., Фоминых Е.Г., Сазанов А.В. Методические подходы к потенциометрическому определению содержания антиоксидантов // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 2. С. 54–62. doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-054-062
13. Тринеева О.В. Методы определения антиоксидантной активности объектов растительного и синтетического происхождения в фармации (обзор) // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2017. № 4. С. 180–197.
14. Яшин А.Я. Методология определения антиоксидантной активности пищевых продуктов и биологических жидкостей // Аналитика. 2021. Т. 11. № 5. С. 370–384. doi: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384
15. Шарафутдинова Е.Н., Иванова А.В., Матерн А.И., Брайнина Х.З. Качество пищевых продуктов и антиоксидантная активность // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15. № 3. С. 281–286.
16. Ziyatdinova G.K., Budnikov H.C. Natural phenolic antioxidants in bioanalytical chemistry: state of the art and prospects of development // Russ. Chem. Rev. 2015. V. 84. No. 2. P. 194–224. doi: 10.1070/RCR4436
17. Geana E.I., Ciucure C.T., Tamaian R., Marinas I.C., Gaboreanu D.M., Stan M., Chitescu C.L. Antioxidant and wound healing bioactive potential of extracts obtained from bark and needles of softwood species // Antioxidants. 2023. V. 12. No. 7. Article No. 1383. doi: 10.3390/antiox12071383

References

1. Uzbekov M.G. Lipid peroxidation and antioxidant defense systems in mental disorders. Part 1 // Social and clinical psychiatry. 2014. V. 24. No. 4. P. 97–103 (in Russian).
2. Gavrilova O.A. Features of lipid peroxidation process in normal conditions and in various pathological conditions in children (review of literature) // Acta Biomedica Scientifica. 2017. V. 2. No. 4. P. 15–22 (in Russian).
3. 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

4. Nadeev A.D., Zinchenko V.P., Avdonin P.V., Goncharov N.V. Toxic and signal properties of active forms of oxygen // Toxicological review. 2014. No. 2. P. 22–27 (in Russian).

5. Abdurakhmanov G.M., Gasangadzhieva A.G., Abdurakhmanova Je.G., Magomedova A.G. The state of environmental components and the incidence of malignant neoplasms in the Lak region of the Republic of Dagestan // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2008. No. 4. P. 109–111 (in Russian).

6. Cherevatenko A.A. Environmental risk factors for public health // Zhurnal fundamentalnoy meditsiny i biologii. 2018. No. 3. P. 39–45 (in Russian).

7. Tseylikman V.E., Lukin A.A. On the effect of oxidative stress on the human body // Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2022. V. 1. No. 3. P. 206–211 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2022.117.3.037

8. Rom O., Aviram M. Endogenous or exogenous antioxidants vs. pro-oxidants in macrophage atherogenicity // Curr. Opin. Lipidol. 2016. V. 27 No. 2. P. 204–206. doi: 10.1097/MOL.0000000000000287

9. Kanwugu O.N., Glukhareva T.V., Danilova I.G., Kovaleva E.G. Natural antioxidants in diabetes treatment and management: prospects of astaxanthin // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2022. V. 62. No. 18. P. 5005–5028. doi: 10.1080/10408398.2021.1881434

10. Burkova V.N., Sergun V.P., Ivanov A.A. Chemical composition and pharmacological activity of aqueous extract of Siberian fir (*Abies sibirica* L.) // Chemistry of plant raw material. 2022. No. 2. P. 19–34 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20220210469

11. Fokina A.I., Adamovich T.A., Trefilova L.V. Approaches to the determination of antioxidants in needle samples of various representatives of the Pine family // Chemistry of plant raw material. 2026. No. 2. P. 255–262 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20260217651

12. Fokina A.I., Nilova A.B., Fominykh E.G., Sazanov A.V. Methodological approaches to antioxidant content by potentiometry // Theoretical and Applied Ecology. 2025. No. 2. P. 54–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2025-2-054-062

13. Trineeva O.V. Methods for determination of antioxidant activity of plant and synthetic origins in pharmacy (review) // Drug development & registration. 2017. No. 4. P. 180–197 (in Russian).

14. Yashin A.Ya. Methodology for determining the antioxidant activity of foods and biological fluids // Analitica. 2021. V. 11. No. 5. P. 370–384 (in Russian). doi: 10.22184/2227-572X.2021.11.5.370.384

15. Sharafutdinova E.N., Ivanova A.V., Matern A.I., Brainina Kh.Z. Foodstuffs quality and antioxidant activity // Analitika i kontrol. 2011. V. 15. No. 3. P. 281–286 (in Russian).

16. Ziyatdinova G.K., Budnikov H.C. Natural phenolic antioxidants in bioanalytical chemistry: state of the art and prospects of development // Russ. Chem. Rev. 2015. V. 84. No. 2. P. 194–224. doi: 10.1070/RCR4436

17. Geana E.I., Ciucure C.T., Tamaian R., Marinascu I.C., Gaboreanu D.M., Stan M., Chitescu C.L. Antioxidant and wound healing bioactive potential of extracts obtained from bark and needles of softwood species // Antioxidants. 2023. V. 12. No. 7. Article No. 1383. doi: 10.3390/antiox12071383

Влияние природного антоциана на продолжительность жизни *Drosophila melanogaster* и устойчивость к ионизирующему излучению

© 2026. Д. А. Голубев^{1,2}, аспирант, м. н. с., Е. Ю. Платонова¹, м. н. с.,
Н. В. Земская¹, м. н. с., О. Г. Шевченко¹, к. б. н., с. н. с.,
М. В. Шапошников¹, к. б. н., в. н. с., П. С. Тумаева³, м. н. с.,
С. А. Патов³, к. х. н., н. с., А. А. Москалев⁴, профессор, чл.-корр. РАН, д. б. н.,

¹Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

²Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,
167001, Россия, г. Сыктывкар, ул. Октябрьский проспект, д. 55,

³Институт химии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 48,

⁴Институт биологии старения и медицины здорового долголетия с клиникой превентивной
медицины ГНЦРФ РНЦХ им. акад. Б.В. Петровского Минобрнауки РФ,
119435, Россия, г. Москва, ул. Абрикосовский переулок, д. 2,
e-mail: golubev.d.a@ib.komisc.ru

Природные биологически активные соединения представляют собой перспективные средства для увеличения продолжительности жизни и повышения устойчивости организмов к экологическим стрессам, однако механизмы их действия остаются недостаточно изученными. В данной работе исследован геропротекторный потенциал природного антоциана цианидин-3-глюкозида (СЗГ), широко распространённого в растениях, с целью оценки его влияния на продолжительность жизни и устойчивость к стрессам у модельного организма *Drosophila melanogaster*, а также выявления молекулярных механизмов действия. Исследовали продолжительность жизни, устойчивость к γ -излучению, окислительному стрессу, уровень экспрессии генов у модельных животных, получавших СЗГ, а также его антиоксидантную активность *in vitro*. Показано, что добавка СЗГ в питательную среду в концентрации 100 мкмоль/л увеличивала медианную продолжительность жизни самцов дрозофил на 9 % ($p < 0,05$), а также повышала их устойчивость к γ -излучению до 9 % ($p < 0,001$) и окислительному стрессу на 30 % ($p < 0,01$). Установлена активация экспрессии генов антиоксидантного транскрипционного фактора *Nrf2* и фермента *prx5*. Тесты *in vitro* подтвердили способность СЗГ эффективно ингибировать перекисное окисление липидов и окисление гемоглобина. Таким образом, СЗГ проявляет выраженные геропротекторные свойства, реализующиеся, в том числе, через механизмы антиоксидантной защиты.

Ключевые слова: цианидин-3-глюкозид, *Drosophila melanogaster*, продолжительность жизни, стрессоустойчивость, антиоксидантная активность.

Effect of natural anthocyanin on *Drosophila melanogaster* lifespan and resistance to ionizing radiation

© 2026. D. A. Golubev^{1,2}, ORCID: 0000-0003-0570-8211, E. Y. Platonova¹, ORCID: 0000-0002-4632-2385,
N. V. Zemskaya¹, ORCID: 0000-0002-8746-0020, O. G. Shevchenko¹, ORCID: 0000-0001-5331-3201,
M. V. Shaposhnikov¹, ORCID: 0000-0002-4625-6488, P. S. Tumaeva³, ORCID: 0009-0004-7135-1972,
S. A. Patov³, ORCID: 0000-0002-5468-989X, A. A. Moskaev⁴, ORCID: 0000-0002-3248-1633,

¹Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

²Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,

55, Oktyabrsky Ave., Syktyvkar, Russia, 167001,

³Institute of Chemistry of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
48 Pervomayskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

⁴Institute of Aging Biology and Healthy Longevity Medicine with
a Preventive Medicine Clinic, Petrovsky National Research Centre of Surgery
2, Abrikosovsky Lane, Moscow, Russia, 119435,
e-mail: golubev.d.a@ib.komisc.ru

Natural bioactive compounds are considered promising agents for increasing lifespan and improving organismal resistance to environmental stressors; however, the mechanisms underlying their geroprotective effects remain insufficiently understood. In this study, we evaluated the biological activity of cyanidin-3-glucoside (C3G), a natural anthocyanin isolated from honeysuckle berries, using *Drosophila melanogaster* as a model organism. The aim of the work was to determine the effects of C3G on lifespan, resistance to γ -irradiation and oxidative stress, as well as to assess possible molecular and antioxidant mechanisms of its action. Adult flies were maintained on a standard nutrient medium supplemented with C3G at concentrations of 1, 10, and 100 $\mu\text{mol/L}$. Lifespan parameters, survival after exposure to γ -irradiation, resistance to paraquat-induced oxidative stress, and the expression of stress-response gene were analyzed. In addition, the antioxidant activity of C3G was evaluated in vitro using biochemical test systems.

Dietary supplementation with C3G at a concentration of 100 $\mu\text{mol/L}$ increased the median lifespan of male flies by 9 % ($p < 0.05$). The compound also enhanced male resistance to γ -irradiation by up to 9 % ($p < 0.001$) and increased survival under oxidative stress conditions by up to 30 % ($p < 0.01$). Gene expression analysis revealed activation of antioxidant defense mechanisms, including increased expression of the transcription factor *Nrf2* and the antioxidant enzyme *prx5*. In vitro assays confirmed that C3G inhibited lipid peroxidation, reduced reactive oxygen species formation, and protected oxyhemoglobin from oxidative damage. Thus, C3G exhibits sex-dependent geroprotective and stress-protective effects, which may be associated with both direct antioxidant activity and activation of endogenous stress-response pathways.

Keywords: cyanidin-3-glucoside, *Drosophila melanogaster*, lifespan, stress resistance, antioxidant activity.

Живые организмы существуют в тесной зависимости от факторов окружающей среды, которые могут как способствовать поддержанию физиологического равновесия, так и выступать в качестве источников стресса [1, 2]. Характеристики среды обитания, включая радиационный фон, пищевые ресурсы, температурный режим и др., способны прямо влиять на старение организма, включая продолжительность и качество жизни [3–5]. Старение представляет собой сложный биологический процесс, определяемый внутренними механизмами (генетическими, молекулярно-клеточными) и внешними причинами, связанными с воздействием окружающей среды (например, ионизирующее излучение) [6]. В последние годы особое внимание уделяется исследованию биологически активных соединений растительного происхождения, способных повышать стрессоустойчивость и замедлять процессы старения [7]. В отличие от синтетических аналогов, растительные вещества, как правило, характеризуются лучшей биодоступностью и меньшей токсичностью [8]. Более того, их получение и использование сопряжено с минимальным воздействием на окружающую среду, что делает их привлекательными не только с точки зрения биомедицины, но и с позиции устойчивого развития и экологически ответственной фармакологии [9]. Исследование таких соединений может

способствовать продлению активного долголетия и развитию подходов к профилактике старения, соответствующих концепции «зелёной химии».

В предыдущих исследованиях было установлено, что экстракты плодов жимолости Палласа (*Lonicera pallasii* L.) и барбариса обыкновенного (*Berberis vulgaris* L.) оказывают геропротекторное действие [10, 11]. Антоцианы, входящие в состав этих экстрактов, демонстрировали способность увеличивать продолжительность жизни (ПЖ) плодовых мушек *Drosophila melanogaster* и модулировать экспрессию генов, ответственных за антиоксидантную защиту [12]. Однако биологические эффекты многих антоцианов, содержащихся в ягодах жимолости, до сих пор остаются недостаточно исследованными. Одним из таких соединений является цианидин-3-глюкозид (C3G). С учётом растущего спроса на безопасные и экологически устойчивые геропротекторы, особый интерес вызывают природные соединения, способные увеличивать устойчивость к неблагоприятным факторам среды. В настоящей работе мы рассматриваем C3G не только как геропротектор, но и как природное соединение, выполняющее ключевые экологические функции. В растениях антоцианы, как и другие вторичные метаболиты, участвуют в защитных механизмах, регулируют взаимодействия с насекомыми и другими животными

и входят в сложные трофические сети экосистем. В наших экспериментах они изучаются как факторы, повышающие устойчивость модельных организмов к неблагоприятным условиям среды (γ -излучение, окислительный стресс). Исследование устойчивости организмов к абиотическим стрессорам является ключевым направлением факториальной экологии. Анализ реакций на такие факторы позволяет оценивать адаптивные возможности организма и выявлять роль природных соединений в модуляции защитных механизмов. Модель *Drosophila melanogaster* в данном контексте представляет удобную систему для изучения того, как растительные соединения (антоцианы) способны изменять интенсивность стресс-ответа и повышать устойчивость к внешним воздействиям.

Таким образом, работа связана с вопросами экологии стрессоустойчивости и адаптации живых систем к изменениям среды. Соответственно, целью настоящего исследования является оценка геропротекторного потенциала СЗГ, выделенного из ягод жимолости, путём изучения его влияния на продолжительность жизни, устойчивость к неблагоприятным факторам окружающей среды у *D. melanogaster*, а также определения его антиоксидантной активности *in vitro*, как одного из возможных механизмов действия.

Материалы и методы исследования

Цианидин-3-глюкозид выделяли из плодов жимолости, собранных на базе «Научной коллекции живых растений» (№ 507428) Ботанического сада Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (61°37'08.3" с. ш., 50°45'42.0" в. д.). Навеску измельчённых ягод трижды экстрагировали раствором 10 % соляной кислоты с 5 % этанолом (10:1) при 25 °С в течение суток в темноте. Экстракты объединяли, упаривали на ротаторном испарителе (35–40 °С) до сиропообразного состояния и лиофильно высушивали. Разделение экстракта проводили методом хроматографии низкого давления на колонке с сорбентом Диасорб 130С16Т, используя ступенчатое элюирование ацетонитрилом в 10 % муравьиной кислоте.

Материалом исследования служили взрослые особи *D. melanogaster* линии дикого типа *Canton-S*. Мух содержали при 25 °С с режимом освещения 12 ч/сут на стандартной питательной среде, приготовленной путём растворения в 1 л воды следующих компонентов:

кукурузная мука – 92 г; сухие дрожжи – 32,1 г; агар – 5,2 г; глюкоза – 136,9 г; пропионовая кислота – 8 мл; метил-4-гидроксibenзоат – 5 мл. Для приготовления стоковых растворов СЗГ растворяли в дистиллированной воде, СЗГ добавляли на питательную среду в концентрациях 1, 10 и 100 мкмоль/л. Контрольная группа получала эквивалентный объём дистиллированной воды без добавления СЗГ. Детальный протокол эксперимента представлен ранее в работе [11].

Продолжительность жизни оценивали ежедневно, рассчитывая медианную (50 % смертность) и максимальную (90 % смертность) ПЖ. Воздействие γ -излучения (300 Гр, Cs-137, 0,74 Гр/мин) проводили на 10 день жизни имаго. Оценивали выживаемость после облучения и устойчивость мух к окислительному стрессу (паракуват, 20 ммоль/л).

Экспрессию генов антиоксидантной защиты анализировали методом qRT-PCR с использованием наборов Aurum Total RNA Mini (Bio-Rad), Quant-iT RNA Assay Kit (Invitrogen), qPCRmix-HS SYBR (Evrogen).

Антиоксидантную активность СЗГ исследовали методами *in vitro* по способности взаимодействовать с радикалами DPPH и ABTS, ингибировать инициированное перекисное окисление липидов (ПОЛ) в модельной системе на основе гомогенатов тканей (головного мозга и семенников) лабораторных животных, а также защищать эритроциты мышей в условиях окислительного гемолиза. Методологические детали приведены в работе [11].

Статистическая обработка проводилась в программах Statistica 13.3 и GraphPad Prism 8.0. Различия кривых выживаемости оценивали лог-ранговым тестом, продолжительность жизни – точным тестом Фишера с поправкой Холма – Бонферрони, другие показатели – методом Манна – Уитни и многомерным дисперсионным анализом (MANOVA). Расширенное описание применённых статистических методик приводится в ранее опубликованной работе [11].

Результаты и обсуждение

Продолжительность жизни является интегральным показателем, отражающим адаптационные способности организмов к изменениям окружающей среды [13]. Поступление в организм различных биоактивных соединений, таких как цианидин, может играть ключевую роль в формировании устойчивости популяций к экологическим факторам

и тем самым способствовать увеличению продолжительности жизни. В данном исследовании анализировалось, как различные концентрации СЗГ (1, 10, 100 мкмоль/л) в составе питательной среды влияют на ПЖ *D. melanogaster*. Показано,

что СЗГ в концентрации 100 мкмоль/л увеличивал максимальную и медианную ПЖ на 3 % у самок и на 9 % у самцов ($p < 0,05$) (табл. 1), соответственно. В остальных случаях результаты оказались недостоверны ($p > 0,05$) (табл. 1).

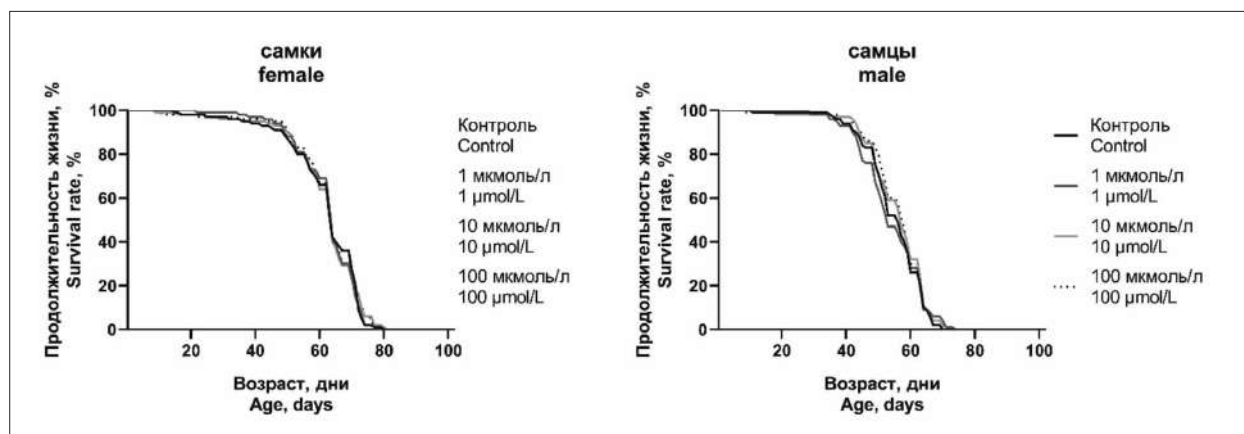


Рис. 1. Влияние цианидин-3-глюкозида (СЗГ) на продолжительность жизни *D. melanogaster*.

Примечание: здесь и на рис. 2–3: Статистическую значимость различий кривых выживаемости оценивали с использованием критерия лог-ранга. Для коррекции множественных сравнений использовали метод Холма – Бонферрони

Fig. 1. Cyanidin-3-glucoside (C3G) effect on *D. melanogaster* lifespan.

Note: here and in Fig. 2–3: Statistical significance of differences in survival curves was assessed using the log-rang test. Holm – Bonferroni correction was applied for multiple comparisons

Таблица 1 / Table 1

Влияние СЗГ на продолжительность жизни *D. melanogaster*
Cyanidin-3-glucoside (C3G) effect on *D. melanogaster* lifespan

Вариант Variant	M	dM	Точный критерий Фишера Fisher's Exact Test		90 %	d90 %	Точный критерий Фишера Fisher's Exact Test		n
			p	p ^{бонф} p ^{bonf}			p	p ^{бонф} p ^{bonf}	
Самки / Females									
Контроль Control	64	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	72	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	274
1 мкмоль/л / μM/L	64	0	0,6	1	73	1	0,2	1	237
10 мкмоль/л / μM/L	64	0	0,5	1	74	3	0,02	0,08	263
100 мкмоль/л / μM/L	64	0	0,9	1	74	3	0,005	0,02	260
Самцы / Males									
Контроль Control	53	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	64	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	265
1 мкмоль/л / μM/L	56	6	0,3	1	65	2	0,8	1	249
10 мкмоль/л / μM/L	57	7	0,1	1	65	2	1	1	277
100 мкмоль/л / μM/L	58	9	0,01	0,04	65	2	0,8	1	282

Примечание к таблицам 1–3: M – медианная продолжительность жизни; 90 % – возраст 90 % смертности (максимальная продолжительность жизни), dM и d90 % – различия между опытной и контрольной группами по медианной и максимальной продолжительности жизни, соответственно. $p^{\text{бонф}}$ – корректировка по методу Холма – Бонферрони, d90% – разница в возрасте при 90 % смертности, n – количество мух. Значимость различий в медианной и максимальной продолжительности жизни была рассчитана с помощью точного теста Фишера, н/п – не применимо.

Note to Tables 1–3: M – median lifespan; 90 % – age at 90 % mortality (maximum lifespan); dM and d90 % – differences between experimental and control groups for median and maximum lifespan, respectively; n – number of flies; p^{bonf} – p-value after Holm – Bonferroni correction. Statistical significance of differences in median and maximum lifespan was assessed using Fisher's exact test, n/a – not applicable.

Поскольку увеличение ПЖ может быть взаимосвязано с повышенной устойчивостью к стрессу, мы исследовали влияние СЗГ на устойчивость *D. melanogaster* к стрессовому фактору γ -излучению.

Ионизирующее излучение является мощным повреждающим фактором, вызывающим разрывы ДНК, усиливающим образование активных форм кислорода и существенно снижающим физиологические показатели организмов [14]. Поэтому нами была проведена оценка влияния СЗГ в концентрациях 1, 10, 100 мкмоль/л на выживаемость мух, подвергнутых действию γ -излучения в дозе

300 Гр. Результаты показывают половые различия в реакции на обработку СЗГ. У самцов СЗГ увеличивал медианную выживаемость до 9 % ($p < 0,001$) и максимальную до 6 % ($p < 0,001$) при концентрации 10 и 100 мкмоль/л (табл. 2). У самок эффекты были статистически незначимыми (табл. 2).

Помимо радиационного воздействия, мы также оценили влияние СЗГ на устойчивость мух к окислительному стрессу, индуцированному паракватом. С возрастом устойчивость организмов к экологическим факторам, включая индукторы окислительного стресса, значительно снижается [15].

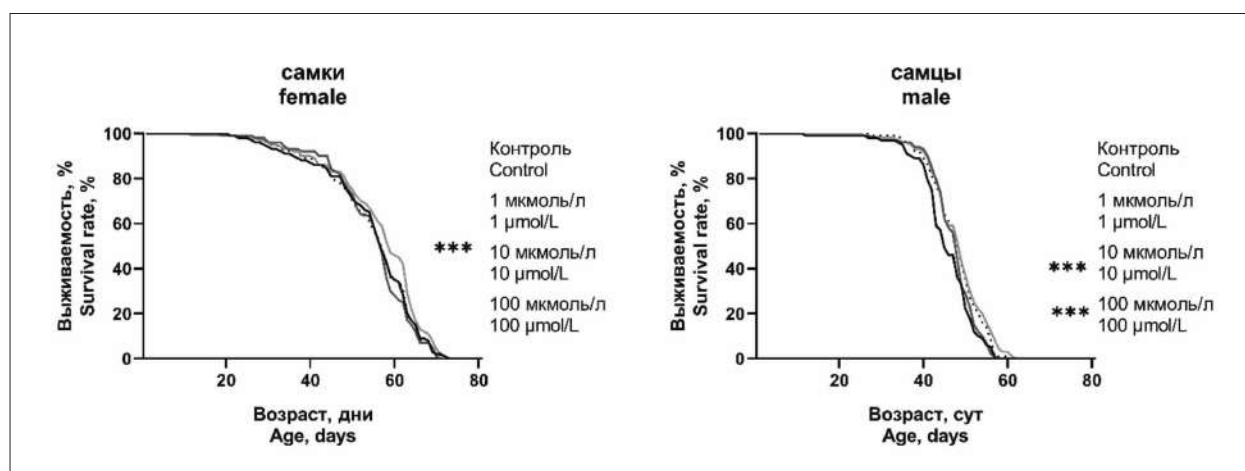


Рис. 2. Влияние СЗГ на выживаемость облучённых *D. melanogaster*. *** – $p < 0,001$
Fig. 2. C3G effect on the survival of irradiated *D. melanogaster*. *** – $p < 0.001$

Таблица 2 / Table 2

Влияние СЗГ на выживаемость *D. melanogaster* после воздействия γ -излучения
C3G effect on *D. melanogaster* survival after γ -irradiation exposure

Вариант Variant	M	dM	Точный критерий Фишера Fisher's Exact Test		90 %	d90 %	Точный критерий Фишера Fisher's Exact Test		n
			p	p ^{бонф} p ^{bonf}			p	p ^{бонф} p ^{bonf}	
Самки / Females									
Контроль / Control	55	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	66	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	262
1 мкмоль/л / μM/L	55	0	0,9	1	69	4	0,2	1	246
10 мкмоль/л / μM/L	58	5	0,04	1	69	4	0,17	1	231
100 мкмоль/л / μM/L	55	0	0,8	1	66	0	0,34	1	295
Самцы / Males									
Контроль / Control	45	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	54	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	348
1 мкмоль/л / μM/L	48	7	0,04	0,1	55	2	0,1	0,4	326
10 мкмоль/л / μM/L	49	9	0	0	57	6	0	0	325
100 мкмоль/л / μM/L	49	9	0	0	56	4	0,008	0,032	344

Понимание взаимодействий между стрессом и ПЖ подчёркивает сложные биологические механизмы, лежащие в основе выживания. Показано, что у самок повышение максимальной выживаемости на 21 % ($p < 0,05$) (табл. 3) наблюдалось лишь при концентрации 100 мкмоль/л СЗГ. У самцов эффект проявлялся уже при 1 мкмоль/л (увеличение на 30 %, $p < 0,01$) (табл. 3) и сохранялся при 100 мкмоль/л (26 %, $p < 0,01$) (табл. 3). При этом ни в одной из экспериментальных групп не было зафиксировано статистически значимых изменений времени медианной выживаемости (рис. 3). Отсутствие эффекта

при 10 мкмоль/л указывает на сложную, нелинейную дозозависимость.

Для выяснения молекулярных механизмов действия СЗГ была проанализирована экспрессия генов, связанных с антиоксидантным и гипоксическим ответом. Анализ транскрипции показал, что цианидин модулирует пути, связанные с окислительным и гипоксическим стрессом, причём характер ответа различается у самцов и самок, подчёркивая важность половых различий. MANOVA выявил статистически значимое влияние СЗГ на общий профиль экспрессии 6 генов (*Nrf2*, *Keap1*, *prx5*, *hif1*, *AttA*, *DptA*) ($p < 0,001$) (рис. 4).

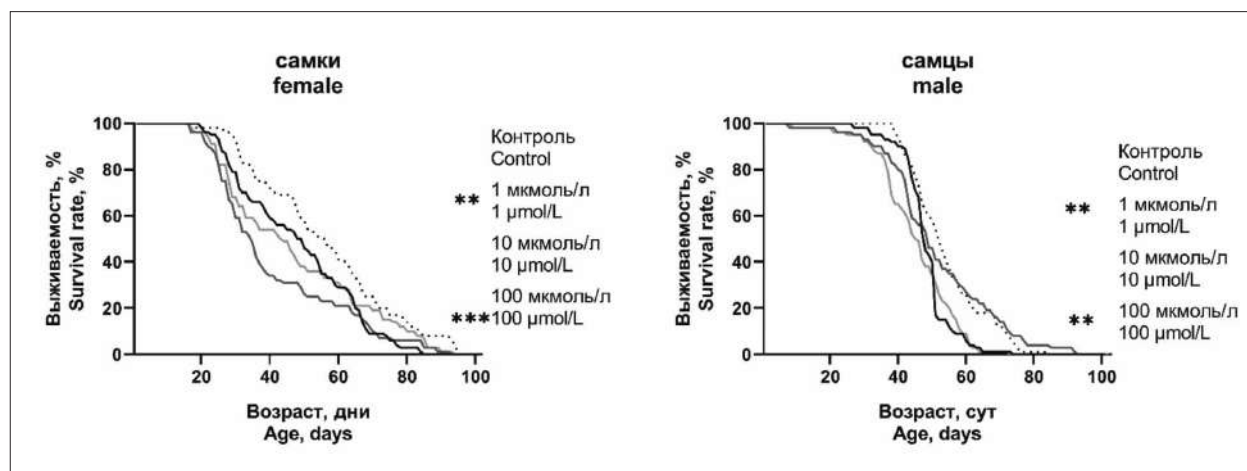


Рис. 3. Устойчивость дрозофил к окислительному стрессу после добавки СЗГ у *D. melanogaster*. ** – $p < 0,01$, *** – $p < 0,001$.

Fig. 3. C3G-induced resistance to oxidative stress in *D. melanogaster*. ** – $p < 0.01$, *** – $p < 0.001$.

Таблица 3 / Table 3

Влияние СЗГ на стрессоустойчивость *D. melanogaster* к параквату
C3G effect on the paraquat-induced stress resistance in *D. melanogaster*

Вариант Variant	M	dM	Точный критерий Фишера Fisher's Exact Test		90 %	d90 %	Точный критерий Фишера Fisher's Exact Test		n
			p	p ^{бонф} p ^{bonf}			p	p ^{бонф} p ^{bonf}	
Самки / Females									
Контроль / Control	62	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	69	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	62
1 мкмоль/л / μM/L	64	3	0,01	1	71	3	1	1	64
10 мкмоль/л / μM/L	57	-8	0,36	1	83	20	0,1	1	57
100 мкмоль/л / μM/L	62	3	0,36	1	84	21	0,01	0,03	62
Самцы / Males									
Контроль / Control	64	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	57	н/п n/a	н/п n/a	н/п n/a	64
1 мкмоль/л / μM/L	62	-3	0,4	1	73	30	0,002	0,006	62
10 мкмоль/л / μM/L	63	-2	0,2	1	59	3	1	1	63
100 мкмоль/л / μM/L	63	-2	0,06	1	72	26	0,002	0,006	63

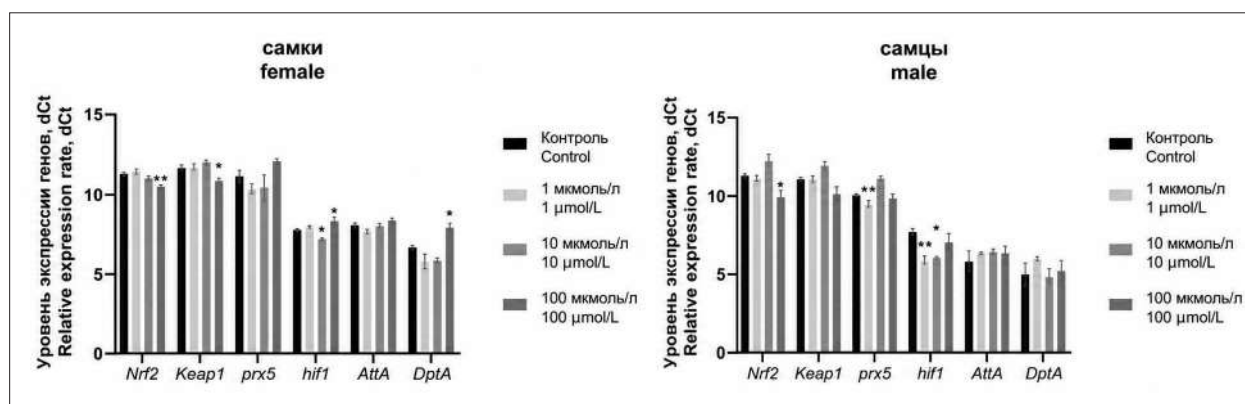


Рис. 4. Воздействие СЗГ на относительные уровни экспрессии генов, отвечающих за стресс-ответ у *D. melanogaster*. Различия в уровнях экспрессии генов, ассоциированных со старением и стресс-реакцией, между контрольной и обработанной группами оценивали с использованием однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) с последующим пост-хок тестом Тьюки (Tukey's HSD). * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$. Более высокие значения ΔCt соответствуют более низкому уровню экспрессии гена / **Fig. 4.** Effect of C3G on relative expression levels of stress-response gene in *D. melanogaster*. Differences in the gene expression associated with aging and stress responses between control and treated groups were assessed using one-way ANOVA followed by Tukey's HSD post hoc test. * – $p < 0,05$, ** – $p < 0,01$. Higher ΔCt values correspond to lower gene expression levels

Пост-хок анализ показал повышение экспрессии *Nrf2* при 100 мкмоль/л у обоих полов ($p < 0,05$) (рис. 4), что свидетельствует об активации антиоксидантного ответа. Одновременно увеличивалась экспрессия его ингибитора *Keap1* у самцов – при 10 мкмоль/л ($p < 0,01$). Экспрессия гена *prx5* у самцов увеличивалась при концентрации 10 мкмоль/л ($p < 0,01$) (рис. 4), тогда как у самок достоверных изменений не отмечено. Экспрессия *hif1* у самцов возрастала при 1 и 10 мкмоль/л ($p < 0,05$) (рис. 4), а у самок – только при 10 мкмоль/л, но снижалась при 100 мкмоль/л ($p < 0,05$) (рис. 4), указывая на дозозависимую регуляцию гипоксической сигнализации. Из антимикробных генов достоверные изменения выявлены только у самок: экспрессия *DptA* снижалась при 100 мкмоль/л ($p < 0,05$), тогда как экспрессия *AttA* не изменялась (рис. 4).

Для подтверждения молекулярных механизмов, выявленных на уровне экспрессии генов, была дополнительно проведена *in vitro* оценка антиоксидантной активности СЗГ. В концентрации 10 мкмоль/л указанное соединение проявило невысокую антирадикальную активность в тестах с DPPH и ABTS, существенно уступая в этом отношении референсным соединениям – тролоксу и кверцетину. Тем не менее, СЗГ проявлял статистически значимую антиоксидантную активность в биологически релевантных тест-системах. В частности, СЗГ статистически значимо тормозил H_2O_2 -инициированное окисление полиненасыщенных жирных кислот в субстрате, содержащем липиды семенников лабораторных

животных, снижая концентрацию вторичных продуктов ПОЛ ТБК-АП (тиобарбитурово-кислотреагирующие продукты) с $15,6 \pm 0,1$ до $11,1 \pm 0,3$ нмоль/мл ($p = 0,021$). Использование САА–RBC-теста показало, что добавление СЗГ в инкубационную среду в концентрации 10 мкМ статистически значимо снижает ($p = 0,001$) образование внутриклеточных

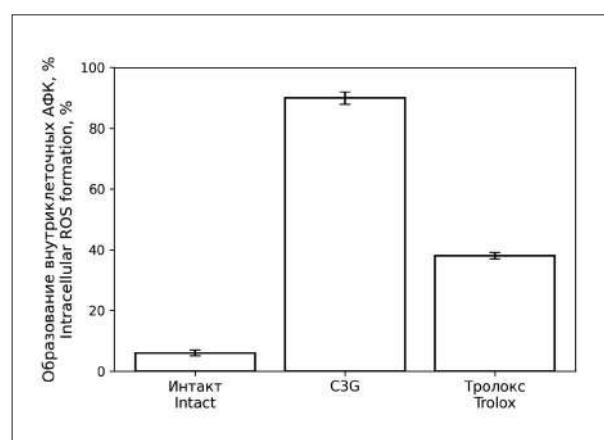


Рис. 5. Снижение ААРН-индуцированной генерации активных форм кислорода (ДФК) в эритроцитах мышей под воздействием СЗГ и тролокса в концентрации 10 мкмоль/л (САА–RBC тест). Интакт – эритроциты без воздействия СЗГ и ААРН. Результаты представлены в процентах по отношению к положительному контролю (эритроциты, обработанные ААРН) / **Fig. 5.** Reduction of AAPH-induced ROS generation in mouse erythrocytes exposed to C3G and Trolox at a concentration of 10 $\mu M/L$ (CAA–RBC test). “Intact” refers to erythrocytes without C3G or AAPH exposure. Results are presented as percentages relative to the positive control (erythrocytes treated with AAPH)

Таблица 4 / Table 4

Влияние СЗГ и тролокса (1 мкмоль/л) на окисление оксигемоглобина и флуоресценцию продуктов распада гема в эритроцитах мышей в моделях H_2O_2 - и ААРН-индуцированного гемолиза / Effects of СЗГ and Trolox (1 μ mol/L) on oxyhemoglobin oxidation and fluorescence of heme degradation products in mouse erythrocytes under H_2O_2 - and ААРН-induced hemolysis models

Образец Sample	Показатель / Parameter			
	Гемолиз / Hemolysis, %	metHb/oxyHb, отн. ед. / rel. units	ferrylHb/oxyHb, отн. ед. / rel. units	IF, отн. ед. / rel. units
Инициатор / Initiator – H_2O_2				
Контроль Control	1,16 ± 0,05	0,293 ± 0,008	8,5 ± 0,4	1,16 ± 0,05
СЗГ	0,772 ± 0,025	0,218 ± 0,007	4,7 ± 0,2	0,772 ± 0,025
Тролокс Trolox	0,906 ± 0,024	0,261 ± 0,004	10,5 ± 0,4	0,906 ± 0,024
Кварцетин Quercetin	0,947 ± 0,027	0,281 ± 0,006	10,7 ± 0,2	0,947 ± 0,027
Инициатор / Initiator – ААРН				
Контроль Control	1,32 ± 0,07	0,679 ± 0,033	5,72 ± 0,07	1,32 ± 0,07
СЗГ	0,988 ± 0,018	0,455 ± 0,010	3,85 ± 0,04	0,988 ± 0,018
Тролокс Trolox	1,58 ± 0,05	0,859 ± 0,016	5,58 ± 0,09	1,58 ± 0,05
Кварцетин Quercetin	0,897 ± 0,044	0,497 ± 0,015	5,88 ± 0,09	0,897 ± 0,044

Примечание: metHb/oxyHb и ferrylHb/oxyHb – соотношение метгемоглобина и феррилгемоглобина к оксигемоглобину, соответственно. IF – интенсивность флуоресценции продуктов распада. Данные представлены в виде среднего значения ± стандартная ошибка. СЗГ – цианидин-3-глюкозид; ААРН – 2,2-азобис(2-амидинопропан) дигидрохлорид.

Note: metHb/oxyHb and ferrylHb/oxyHb – the ratios of methemoglobin and ferrylhemoglobin to oxyhemoglobin, respectively. IF – the fluorescence intensity of degradation products. Data are presented as mean ± standard error. ААРН – 2,2-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride.

активных форм кислорода (АФК), стимулированного воздействием индуктора окислительного стресса – ААРН (рис. 5). На модели индуцированного гемолиза, инициированного внесением H_2O_2 либо ААРН, показано, что в концентрации 1 мкМ СЗГ хотя и не увеличивал выживаемость клеток, однако эффективно защищал оксигемоглобин от окисления до мет- и феррилгемоглобина ($p = 0,001$), а также ингибировал окисление гема ($p = 0,001$), заметно превосходя в этом отношении тролокс и кварцетин.

САА–RBC тест показал, что СЗГ (10 мкмоль/л) снижает уровень АФК при стимуляции ААРН ($p = 0,001$). При гемолизе, вызванном H_2O_2 или ААРН, СЗГ (1 мкмоль/л) не повышал выживаемость клеток, но защищал оксигемоглобин от окисления до мет- и феррилформ ($p = 0,001$) и подавлял разрушение гема (снижение IF, $p = 0,001$), превосходя тролокс и кварцетин. Таким образом, СЗГ из жимолости проявил антиоксидантные свойства в биологически релевантных моделях *in vitro*: снижал интенсивность инициированного ПОЛ в субстрате на основе гомогенатов тканей

лабораторных животных, а также ингибировал образование АФК и окисление гемоглобина в эритроцитах в условиях окислительного гемолиза.

В нашем исследовании установлено, что СЗГ может продлевать жизнь *D. melanogaster*, причём эффект преимущественно наблюдался у самцов. При концентрации 100 мкмоль/л СЗГ медианная ПЖ самцов увеличивалась на 9 % по сравнению с контролем, тогда как у самок наблюдалось увеличение максимальной ПЖ всего на 3 %. Подобный геропротекторный эффект согласуется с данными литературы. Например, добавка в питательную среду экстракта черноплодной рябины, богатого антоцианами (включая СЗГ), увеличивала среднюю ПЖ дрозофил на 18 % [16].

Полученные нами результаты исследования природного СЗГ демонстрируют, что антоциановый компонент ягод оказывает прямое геропротекторное действие, выраженность которого определяется дозой и биологическим полом животных. Кроме влияния на продолжительность жизни, СЗГ повысил устойчивость мух к острым стрессовым воз-

действиям, таким как γ -облучение и окислительный стресс, также преимущественно у самцов. В наших экспериментах самцы, содержащиеся на питательной среде с СЗГ (10 и 100 мкмоль/л), демонстрировали более высокую медианную выживаемость после воздействия облучения (300 Гр). Повышение стрессоустойчивости согласуется с известными свойствами полифенольных антиоксидантов как радиопротекторов. В частности, предварительное кратковременное добавление флавоноидов, таких как кверцетин и эпикатехин, улучшает выживаемость мух при остром γ -облучении и других видах стресса за счёт активации защитных внутриклеточных сигнальных путей [17]. Возможно, СЗГ действует сходным образом, повышая резистентность к повреждениям, вызываемым ионизирующим излучением и ПОЛ. В наших исследованиях усиление стрессоустойчивости дрозофил к воздействию острого ионизирующего излучения может быть обусловлено способностью СЗГ препятствовать чрезмерной интенсификации ПОЛ, поскольку именно активация свободно-радикальных процессов рассматривается как ключевое звено в развитии радиационных поражений организма.

Исследования молекулярных механизмов свидетельствуют о том, что СЗГ активирует антиоксидантные системы защиты, особенно у самцов. Мы обнаружили повышенную экспрессию гена транскрипционного фактора *Nrf2* и гена антиоксидантного фермента *prx5* в организме самцов после обработки СЗГ, тогда как у самок эти изменения были менее выражены. Подобный половой диморфизм может отражать различия в уровне антиоксидантной защиты. *Nrf2* известен как главный регулятор антиоксидантного ответа и ранее уже был связан с регуляцией старения и долголетия. В частности, конститутивная активация пути *Nrf2* в организме мух посредством инактивации его ингибитора *Keap1* приводит к повышению устойчивости к оксидативному стрессу и продлению жизни, преимущественно у самцов *Drosophila* [18]. Таким образом, усиление экспрессии *Nrf2* под действием СЗГ у самцов свидетельствует о вовлечении этого антиоксидантного пути в механизм действия препарата. Подобные наблюдения сделаны и в отношении пищевых антоцианов: так, добавление в рацион дрозофил экстракта клюквы не только продлевает им жизнь, но и сопровождается повышением активности антиоксидантных ферментов, например супероксиддисмутазы [19]. Кроме того, приведённое нами прямое

определение антиоксидантной активности СЗГ *in vitro* подтвердило его способность защищать биомолекулы от окислительного повреждения. Методом САА–RBC, а также на модели окислительного гемолиза эритроцитов выявлена высокая антиоксидантная активность СЗГ, что согласуется с данными литературы, касающимися антиоксидантных свойств иных цианидинов [20]. Вероятно, в организме дрозофил СЗГ реализует своё действие комбинированно: с одной стороны напрямую нейтрализует свободные радикалы, а с другой – через активацию *Nrf2*-зависимых генов усиливает антиоксидантный потенциал клеток.

Особого внимания заслуживает наблюдаемый дозозависимый эффект СЗГ и его зависимость от пола животных. Для растительных антоцианов часто характерна дозозависимая активация антиоксидантных систем организма [21]. В наших экспериментах максимальные эффекты у самцов отмечались при 100 мкмоль/л СЗГ: именно при этой дозе медианная ПЖ самцов увеличивалась на 9 %, а выживаемость после воздействия γ -излучения и окислительного стресса возрастала соответственно до 9 % и 30 %. Такие эффекты, по-видимому, обусловлены тем, что активация защитных систем организма напрямую зависит от дозы СЗГ. Мы зафиксировали регуляцию *hif1* (гипоксического фактора) под влиянием СЗГ: при концентрации 1 и 10 мкмоль/л экспрессия увеличивалась у самцов, а у самок только при 10 мкмоль/л. Требуются дальнейшие исследования для полного понимания влияния СЗГ на внутриклеточный сигнальный путь HIF–1, однако уже ясно, что эффект этого соединения на данный сигнальный путь носит дозозависимый характер.

Половой диморфизм реакции самцов и самок *D. melanogaster* на действие СЗГ, выявленный в нашей работе, согласуется с растущим числом данных о биологическом действии, степень выраженности которого зависит как от дозы СЗГ, так и от пола животных [22]. Мы наблюдали, что самцы дрозофил получают значительное преимущество от СЗГ в плане продления жизни и стрессоустойчивости, тогда как у самок эффект практически отсутствует. Причины такого различия могут быть связаны с половым диморфизмом. Возможно, самки изначально обладают более мощной системой антиоксидантной защиты и потому вследствие чего СЗГ даёт им менее выраженный геропротекторный эффект. С другой стороны, самцы, имеющие более короткую ПЖ и

меньшие затраты ресурсов на репродукцию, могли активировать дополнительные защитные пути. Подобную специфику, зависящую от пола животных, отмечали и в других работах. Например, ингибитор mTOR рапамицин продлевает жизнь самок *Drosophila*, тогда как у самцов он неэффективен [23]. В экспериментах с ограничением питания у дрозофил также показано, что эффект продления жизни гораздо более выражен у самок, чем у самцов [24]. Наши данные подчёркивают необходимость учёта половых различий при оценке геропротекторной активности соединений: очевидно, что биологический пол может влиять на эффективность активации тех или иных защитных сигнальных путей (например, *Nrf2*, аутофагии и др.), опосредующих продление жизни. Полученные нами результаты согласуются с данными литературы и позволяют предположить, что СЗГ является перспективным геропротекторным соединением с выраженными антиоксидантными и радиопротекторными свойствами. Его действие реализуется через активацию внутренних защитных механизмов (*Nrf2*-зависимых и др.) и проявляет горметические свойства, а эффективность обусловлена, помимо дозы, биологическим полом. Выявленный половой диморфизм, по-видимому, обусловлен совокупностью факторов, включая различия в базовом уровне антиоксидантной защиты, особенности метаболизма и биодоступности СЗГ, а также специфические особенности стресс-ответа у самцов и самок.

Таким образом, в условиях усиливающегося экологического стресса диетические антиоксиданты типа СЗГ представляют значительный интерес как потенциальные средства повышения устойчивости организма к неблагоприятным факторам среды, что, в конечном счёте, может способствовать сохранению здоровья и продлению жизни.

Заключение

Наше исследование демонстрирует, что природный антоцианин СЗГ способен замедлять старение модельного организма *D. melanogaster*, продлевая жизнь и повышая устойчивость к неблагоприятным экологическим факторам. Молекулярный анализ выявил, что эффект СЗГ связан с активацией путей стрессоустойчивости, включая транскрипционный фактор *Nrf2* и его таргетные гены, такие как *prx5*. Таким образом, проведённое исследование демонстрирует по-

тенциальный геропротекторный эффект природного антоциана СЗГ. Полученные результаты открывают перспективы для разработки безопасных природных геропротекторов на основе СЗГ. В дальнейшем целесообразно изучить молекулярные механизмы его действия на других модельных организмах, оценить эффективность при комбинированном воздействии стрессовых факторов и проверить возможность применения СЗГ для повышения устойчивости организмов к неблагоприятным условиям среды.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН по теме «Генетические механизмы стрессоустойчивости и контроля продолжительности жизни для поиска новых мишеней для геропротекторных вмешательств на модели *Drosophila melanogaster*» № 125013101228-2.*

Мы выражаем благодарность Центру коллективного пользования «Молекулярная биология» Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ИБ Коми НЦ УрО РАН) за предоставленное оборудование для анализа антиоксидантной активности, а также РНК и кДНК. Также благодарим ИБ Коми НЦ УрО РАН за предоставление мух (<https://ckp-rf.ru/catalog/usu/471927/>) и мышей (<http://www.ckp-rf.ru/usu/471933/>) из научных коллекций. Отдельную благодарность выражаем Центру коллективного пользования Института химии Коми научного центра УрО РАН (<https://chemi.komisc.ru/>) за предоставление исследуемого вещества и подтверждение его структуры с использованием высокоточного аналитического оборудования.

References

1. Sundas A., Contreras I., Mujahid O., Beneyto A., Vehi J. The effects of environmental factors on general human health: a scoping review // Healthcare. 2024. V. 12. No. 21. Article No. 2123. doi: 10.3390/healthcare12212123
2. Adamski Z., Ntalli N., Słocińska M., Scrano L. Editorial: Physiological response to environmental stressors in invertebrates // Front. Physiol. 2022. V. 13. Article No. 1002192. doi: 10.3389/fphys.2022.1002192
3. Lowry K.P., Turan E.A., Eisenberg J., Kong C.Y., Barnes J.A., Pandharipande P.V. Projected effects of radiation-induced cancers on life expectancy in patients undergoing CT surveillance for limited-stage Hodgkin lymphoma: a Markov model // Am. J. Roentgenol. 2015. V. 204. No. 6. P. 1228–1233. doi: 10.2214/ajr.14.13287

4. Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A., Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: a review // *Front. Public Health*. 2020. V. 8. No. 20. Article No. 14. doi: 10.3389/fpubh.2020.00014
5. Myers S.S., Gaffikin L., Golden C.D., Ostfeld R.S., Redford K.H., Ricketts T.H., Turner W.R., Osofsky S.A. Human health impacts of ecosystem alteration // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2013. V. 110. No. 47. P. 18753–18760. doi: 10.1073/pnas.1218656110
6. Navarro C., Salazar J., Díaz M.P., Chacin M., Santeliz R., Vera I., Marco L.D., Parra H., Bernal M.C., Castro A., Escalona D., García-Pacheco H., Bermúdez V. Intrinsic and environmental basis of aging: a narrative review // *Heliyon*. 2023. V. 9. No. 8. Article No. e18239. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e18239
7. Bilal S., Saad Jan S., Shahid M., Asaf S., Khan A.L., Lubna, Al-Rawahi A., Lee I.J., Al-Harrasi A. Novel insights into exogenous phytohormones: central regulators in the modulation of physiological, biochemical, and molecular responses in rice under metal(loid) stress // *Metabolites*. 2023. V. 13. No. 10. Article No. 1036. doi: 10.3390/metabo13101036
8. Barathi S., Ramalingam S., Krishnasamy G., Lee J. Exploring the biomedical frontiers of plant-derived nanoparticles: synthesis and biological reactions // *Pharmaceutics*. 2024. V. 16. No. 7. Article No. 923. doi: 10.3390/pharmaceutics16070923
9. Arif Z.U., Khalid M.Y., Noroozi R., Hossain M., Shi H.H., Tariq A., Ramakrishna S., Umer R. Additive manufacturing of sustainable biomaterials for biomedical applications // *Asian J. Pharm. Sci.* 2023. V. 18. No. 3. Article No. 100812. doi: 10.1016/j.ajps.2023.100812
10. Golubev D., Zemskaya N., Shevchenko O., Shaposhnikov M., Kukuman D., Patov S., Punegov V., Moskalev A. Honeysuckle extract (*Lonicera pallasii* L.) exerts antioxidant properties and extends the lifespan and healthspan of *Drosophila melanogaster* // *Biogerontology*. 2022. V. 23. No. 2. P. 215–235. doi: 10.1007/s10522-022-09954-1
11. Golubev D., Platonova E., Zemskaya N., Shevchenko O., Shaposhnikov M., Nekrasova P., Patov S., Ibragimova U., Valuisky N., Borisov A., Zhukova X., Sorokina S., Litvinov R., Moskalev A. *Berberis vulgaris* L. extract supplementation exerts regulatory effects on the lifespan and healthspan of *Drosophila* through its antioxidant activity depending on the sex // *Biogerontology*. 2024. V. 25. No. 3. P. 507–528. doi: 10.1007/s10522-023-10083-6
12. Rahman S., Mathew S., Nair P., Ramadan W.S., Vazhappilly C.G. Health benefits of cyanidin-3-glucoside as a potent modulator of Nrf2-mediated oxidative stress // *Inflammopharmacol.* 2021. V. 29. No. 4. P. 907–923. doi: 10.1007/s10787-021-00799-7
13. Omotoso O., Gladyshev V.N., Zhou X. Lifespan extension in long-lived vertebrates rooted in ecological adaptation // *Front. Cell Dev. Biol.* 2021. V. 9. Article No. 704966. doi: 10.3389/fcell.2021.704966
14. Azzam E.I., Jay-Gerin J.P., Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury // *Cancer Lett.* 2012. V. 327. No. 1–2. P. 48–60. doi: 10.1016/j.canlet.2011.12.012
15. Dues D.J., Andrews E.K., Schaar C.E., Bergsma A.L., Senchuk M.M., Van Raamsdonk J.M. Aging causes decreased resistance to multiple stresses and a failure to activate specific stress response pathways // *Aging*. 2016. V. 8. No. 4. P. 777–795. doi: 10.18632/aging.100939
16. Jo A.R., Imm J.Y. Effects of aronia extract on lifespan and age-related oxidative stress in *Drosophila melanogaster* // *Food Sci. Biotechnol.* 2017. V. 26. No. 5. P. 1399–1406. doi: 10.1007/s10068-017-0180-5
17. Proshkina E., Lashmanova E., Dobrovolskaya E., Zemskaya N., Kudryavtseva A., Shaposhnikov M., Moskalev A. Geroprotective and radioprotective activity of quercetin, (–)-epicatechin, and ibuprofen in *Drosophila melanogaster* // *Front. Pharmacol.* 2016. V. 7. Article No. 505. doi: 10.3389/fphar.2016.00505
18. Sykiotis G.P., Bohmann D. Keap1/Nrf2 signaling regulates oxidative stress tolerance and lifespan in *Drosophila* // *Dev. Cell*. 2008. V. 14. No. 1. P. 76–85. doi: 10.1016/j.devcel.2007.12.002
19. Wang L., Li Y.M., Lei L., Liu Y., Wang X., Ma K.Y., Chen Z.Y. Cranberry anthocyanin extract prolongs lifespan of fruit flies // *Exp. Gerontol.* 2015. V. 69. P. 189–195. doi: 10.1016/j.exger.2015.06.021
20. Sadowska-Bartosch I., Bartosz G. Antioxidant activity of anthocyanins and anthocyanidins: a critical review // *Int. J. Mol. Sci.* 2024. V. 25. No. 22. Article No. 12001. doi: 10.3390/ijms252212001
21. Chen J., Sun H., Sun A., Lin Q.H., Wang Y., Tao X. Studies of the protective effect and antioxidant mechanism of blueberry anthocyanins in a CC14-induced liver injury model in mice // *Food Agric. Immunol.* 2012. V. 23. No. 4. P. 352–362. doi: 10.1080/09540105.2011.634378
22. Knufinke M., MacArthur M.R., Ewald C.Y., Mitchell S.J. Sex differences in pharmacological interventions and their effects on lifespan and healthspan outcomes: a systematic review // *Front. Aging*. 2023. V. 4. Article No. 1172789. doi: 10.3389/fragi.2023.1172789
23. Regan J.C., Lu Y.X., Ureña E., Meilenbrock R.L., Catterson J.H., Kibler D., Fröhlich J., Funk E., Partridge L. Sexual identity of enterocytes regulates autophagy to determine intestinal health, lifespan and responses to rapamycin // *Nat. Aging*. 2022. V. 2. No. 12. P. 1145–1158. doi: 10.1038/s43587-022-00308-7
24. Magwere T., Chapman T., Partridge L. Sex differences in the effect of dietary restriction on life span and mortality rates in female and male *Drosophila melanogaster* // *J. Gerontol. A Biol. Sci. Med. Sci.* 2004. V. 59. No. 1. P. 3–9. doi: 10.1093/gerona/59.1.b3

Разработка методики одновременного определения жирных и фенольных кислот – ценных вторичных метаболитов плодов рябины (*Sorbus* L.)

© 2026. Н. Э. Вебер, аспирант, И. В. Груздев, д. х. н., в. н. с.,
О. Г. Шевченко, к. б. н., с. н. с., О. В. Скроцкая, к. б. н., зав. отделом,
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: veber.n@ib.komisc.ru

Плоды рябины (*Sorbus* L.) хорошо известны своими питательными и лечебными свойствами, часть из которых напрямую связана с высоким содержанием органических кислот. Антиоксидантная активность плодов рябины ассоциирована с фенолкарбоновыми кислотами, в то время как биологическая ценность её липидного комплекса определяется наличием в составе липидов незаменимых жирных кислот из рядов ω -3 и ω -6. Для отдельного определения высших карбоновых кислот и фенолкислот при их совместном присутствии в растительных материалах разработана экстракционно-хроматографическая методика, при реализации аналитического цикла которой происходит полное отделение соединений этих двух классов органических кислот. Идентификацию и количественное определение кислот проводят газохроматографическими методами с масс-селективным или пламенно-ионизационным детектором (ГХ-МС/ПИД). Апробация методики проведена на плодах разных видов и сортов рода *Sorbus*, широко представленных в научной коллекции Ботанического сада ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. В экстрактах из плодов рябины методом ГХ-МС было идентифицировано 18 жирных и 7 фенольных кислот. Проведена сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов плодов рябины различных видов и сортов. Выявлены образцы (*S. aucuparia* subsp. *phuashanensis*), сочетающие высокое содержание феруловой и кофейной кислот с выраженной антиоксидантной активностью. Разработанная методика определения органических кислот в растительных материалах может быть рекомендована для сопровождения селекционного процесса и направленного отбора растений для производства фитопрепаратов и биологически активных добавок.

Ключевые слова: жирные кислоты, фенольные кислоты, рябина (*Sorbus* L.), газовая хроматография, антиоксидантная активность.

Development of a method for the simultaneous determination of fatty and phenolic acids – valuable secondary metabolites of rowan berries (*Sorbus* L.)

© 2026. N. E. Veber ORCID: 0000-0003-4165-365X, I. V. Gruzdev ORCID: 0000-0002-6693-3925,
O. G. Shevchenko ORCID: 0000-0001-5331-3201, O. V. Skrotskaya ORCID: 0000-0001-8090-1308*
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: veber.n@ib.komisc.ru

Rowanberry fruits (*Sorbus* L.) are well known for their nutritional and medicinal properties, some of which are directly related to their high content of organic acids. The antioxidant activity of rowan fruits is associated with phenolic carboxylic acids, while the biological value of their lipid complex is determined by the presence of essential ω -3 and ω -6 fatty acids. An extraction-chromatographic method was developed to separate the higher carboxylic and phenolic acids in plant raw material. This method allows complete separation of these two classes of organic acids during the analytical cycle. The acids identification and quantification are performed using gas chromatography with a mass-selective or flame-ionization detector (GC-MS/FID). The method was tested on the fruits of *Sorbus* various species and cultivars, which are widely represented in the scientific collection of the Botanical Garden of the Institute of Biology at the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Using GC-MS, 18 fatty acids and 7 phenolic acids were identified in the extracts of rowan fruits. A comparative assessment of the antioxidant activity of extracts from rowan fruits of different species and cultivars was carried out. We identify samples (*S. aucuparia* subsp. *phuashanensis*)

that combine high content of ferulic and caffeic acids with pronounced antioxidant activity. The developed method for determining organic acids in plant raw material can be recommended for supporting the breeding process and targeted selection of plants for phytopharmaceuticals and dietary supplements production.

Keywords: fatty acids, phenolic acids, *Sorbus* L., gas chromatography, antioxidant activity.

Виды рода *Sorbus* L. – рябина (семейство Rosaceae Juss.) произрастают в разнообразных почвенно-климатических условиях в умеренном поясе Северного полушария, встречаются в условиях высокогорных тропиков и субтропиков, в арктическом поясе. В пределах территории бывшего СССР – около 30 видов [1–4], в Республике Коми отмечены два вида рябины – *Sorbus aucuparia* и *S. aucuparia* subsp. *glabrata* [5].

В Ботаническом саду ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН родовой комплекс видов *Sorbus* формируется с 1946 г. В настоящее время в Ботаническом саду изучаются и сохраняются более 30 таксонов рябины. Растения выращены из семян, полученных по делектусам из ботанических учреждений России и зарубежья, привлечены саженцами из плодово-ягодных питомников и природных местообитаний. Изучаемые виды рябины – представители европейско-средиземноморской, евроазиатской и восточноазиатской флор.

Различные виды рябины (включая отборные образцы и формы) могут служить донорами таких признаков, как низкорослость, отсутствие горечи в плодах, крупноплодность, некоторые обладают достаточной зимостойкостью, что определяет возможность их культивирования в условиях Севера.

Ценные питательные и лечебные свойства плодов рябины обуславливают их востребованность в фармацевтической и пищевой индустрии, а также в методах нетрадиционной медицины. Различные виды и сорта рябины характеризуются многокомпонентным химическим составом [6], в плодах идентифицированы углеводы (до 7,5 %), комплекс органических кислот – янтарная, лимонная, яблочная, винная и др. (2–3 %), а также фенолкарбоновые кислоты, аминокислоты, катехины, флавоноиды и тритерпены (до 2 %), танины, пектины и каротиноиды (до 1 %), витамины (С, В₂, Е, Р) и широкий спектр неорганических компонентов [7, 8].

Высокое содержание фенольных соединений в плодах рябины делает их ценным источником биологически активных соединений, потребление которых в ежедневном рационе снижает риск заболеваний, связанных со старением [9]. Среди химических свойств

фенольных кислот особый интерес вызывает антиоксидантная активность, зависящая, прежде всего, от количества и положения фенольных гидроксильных групп, присутствия в молекулах донорных метоксильных групп ($-\text{OCH}_3$), а также от структуры карбоксильной группы ($-\text{COOH}$, $-\text{CH}=\text{CHCOOH}$, $-\text{CH}_2\text{COOH}$) [10, 11].

Другие важнейшие органические соединения плодов рябины – высшие (жирные) алифатические карбоновые кислоты. Для поддержания здоровья человеку критически важны несинтезируемые полиненасыщенные жирные кислоты линолевого и линоленового рядов (*омега*-6 и *омега*-3), поступающие только с пищей [12–14]. В связи с этим, растения выступают важнейшим источником омега-кислот, содержание которых сильно варьирует и определяется таксономической принадлежностью и климатическими условиями произрастания растений [15, 16].

Уникальные свойства и высокая ценность органических кислот в комплексе с другими биологически активными веществами могут быть использованы для осуществления химического контроля селекционного процесса и целенаправленного отбора интродуцируемых в Ботаническом саду растений. В связи с этим актуальна разработка методик, позволяющих в рамках одного аналитического цикла определять жирные и фенольные кислоты в растительных материалах для реализации таких исследований.

Анализ индивидуальных органических кислот в растительных материалах обычно включает несколько последовательных стадий: экстракцию, химическую модификацию, идентификацию и количественный анализ хроматографическими методами [17, 18].

Извлечение кислот из растений, как правило, проводят путём экстракции органическими экстрагентами, для чего применяют распространённые растворители (гексан, диэтиловый эфир, метанол, этанол, хлороформ и др.) – как в чистом виде, так и смеси при разных соотношениях полярных и неполярных экстрагентов [19–22].

В экстрактах из растительных материалов органические кислоты анализируют методом высокоэффективной жидкостной хроматогра-

фии (ВЭЖХ) с хемилюминесцентным [23], масс-селективным [24–27] или с фотодиодным матричным детектором [25–27].

В качестве альтернативы ВЭЖХ при определении органических кислот в растениях выступают газохроматографические методы (ГХ). Важная особенность ГХ методов – стадия этерификации кислот, необходимая для увеличения летучести анализируемых соединений [28, 29]. Высокая реакционная способность гидроксильных и карбоксильных групп органических кислот предоставляет широкие возможности для проведения дериватизации и позволяет решать самые сложные аналитические задачи [28–30]. Наиболее устойчивые дериваты органических кислот получают по реакциям алкилирования [31–33] и силилирования [34–36], которые, после разделения на силиконовых неподвижных жидких фазах, определяют при помощи пламенно-ионизационного [32–34] или масс-спектрометрического детектора [31, 35, 36].

При сравнении ВЭЖХ и ГХ методов преимуществом, на наш взгляд, обладают ГХ методы, располагающие высокоэффективными капиллярными колонками и большими возможностями при масс-спектрометрическом детектировании кислот из-за наличия обширных баз данных масс-спектров (NIST, Wiley, MPW и др.) [24, 37, 38]. Кроме того, методы химической модификации, которые активно развиваются именно в газовой хроматографии, позволяют существенно расширить круг анализируемых соединений [29, 30, 39].

При изучении компонентного состава экстрактов, полученных из растений, часто возникает необходимость удаления сопутствующих компонентов или полного выделения аналитов ещё до проведения инструментального анализа. Так, содержание фенольных кислот в некоторых лекарственных растениях может на порядок и более отличаться от содержания жирных кислот, что делает невозможным их одновременное определение даже хроматографическими методами [24, 40].

Цель работы – разработка высокоселективного способа одновременного определения фенольных и жирных кислот в растительных материалах (плоды представителей рода *Sorbus* L.) методом газовой хроматографии, а также сравнительная оценка содержания органических кислот и антиоксидантной активности экстрактов, полученных из плодов разных видов и сортов рябины.

Объекты и методы исследования

Методика определения жирных и фенольных кислот в плодах рябины. Измельчённые воздушно-сухие образцы рябины массой 0,25–0,50 г переносили в коническую колбу (100 см³), вводили 10 см³ метанола и проводили экстрагирование на перемешивающем устройстве (ELMI S-3L.A20, Латвия) при частоте 150 об./мин в течение 30 мин. Часть полученного спиртового экстракта объёмом 5 см³ отбирали в стеклянную винтовую вialу вместимостью 15 см³ и добавляли 350 мм³ соляной кислоты (38 %). Для проведения кислотного метанолиза органических кислот вialу герметично закрывали и в течение 90 мин термостатировали при 90 °С. Далее смесь охлаждали, добавляли 0,5 см³ раствора гексадекана в толуоле (0,1 мг/см³), 1,5 см³ раствора NaOH (3 моль/дм³), 2,5 см³ насыщенного раствора NaCl и экстрагировали в течение 5 мин. Полученный толуольный экстракт анализировали методом ГХ с использованием пламенно-ионизационного детектора (ПИД) на содержание жирных кислот.

Идентификацию метиловых эфиров жирных кислот в экстракте проводили методом хромато-масс-спектрометрии: газовый хроматограф «Thermo GC Ultra» (Thermo, США) с масс-селективным детектором «DSQ» (Thermo) в режиме электронного удара (70 эВ, диапазон сканирования масс 45–650 Да). Для анализа масс-спектров применяли программное обеспечение Xcalibur 1.4 (Thermo), AMDIS 2.73 (NIST) и библиотеку масс-спектров NIST 05 (350 тыс. соединений).

Количественный анализ жирных кислот проводили на газовом хроматографе «TRACE 1310» (Thermo) с ПИД методом внутреннего стандарта (внутренний стандарт – гексадекан) при следующих условиях: кварцевая капиллярная колонка HP-FFAP (Agilent, США) 30 м × 0,32 мм × 0,25 мкм; газ-носитель – гелий (99,995 %), скорость потока через колонку – 0,8 см³/мин; программирование температуры термостата колонок 110 °С – 5 °С/мин – 245 °С, скорость потока воздуха (ПИД) – 200 см³/мин, скорость потока водорода (ПИД) – 20 см³/мин, деление потока – 1:25. Температура испарителя 280 °С, детектора 250 °С.

Оставшийся после выделения жирных кислот водно-спиртовой раствор анализировали на содержание фенольных кислот по методике, приведённой в работе [41].

Методика определения антиоксидантной активности. Сравнительная оценка антиоксидантной активности экстрактов плодов рябины проведена на традиционных моделях *in vitro* [42–47]. Для анализа антирадикальной активности (АРА) применены тесты с катион-радикалом диаммониевой соли 2,2'-азинобис(3-этилбензтиазолин-6-сульфоукислоты) (ABTS) [48–50] и 2,2-дифенил-1-пикрилгидразином (DPPH) [48, 51]. Ингибирующая способность экстрактов Fe^{2+} /аскорбат-инициированного перекисного окисления липидов (ПОЛ) оценена в модельном субстрате (эмульсии «масло в воде»), полученном на основе гомогенатов головного мозга мышей [52–54].

Для инкубации субстрата применяли орбитальный шейкер-инкубатор ES-20 (BioSan, Латвия). Поглощение измеряли с помощью спектрофотометра «Genesys 20» (Thermo Spectronic, США). В качестве стандартов использовали растворы галловой и 4-гидроксикоричной (*пара*-кумаровой) кислот в метаноле в концентрации, соответствующей уровню содержания фенольных кислот в исследуемых экстрактах (20 мг/см³).

Для статистической обработки данных применяли программы Statistica 6.0 и Microsoft Office Excel (2007). Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка выборки (4–8 повторностей). Статистическая значимость различий рассчитана по критерию Манна–Уитни (Mann–Whitney, U-test), *p* – уровень значимости различий. Взаимосвязь между отдельными параметрами оценена по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена (*r*).

Результаты и обсуждение

Методика количественного химического анализа органических кислот в растительных материалах. Предложен способ определения высших карбоновых и фенольных кислот в растительных материалах при их совместном присутствии, при реализации которого происходит полное отделение соединений этих двух классов органических кислот (рис. 1).

Основной вклад в повышение селективности определения аналитов достигается за счёт применения двухстадийной химической модификации (рис. 2). В условиях кислотного метанолиза этерификации подвергаются только карбоксильные группы, входящие в состав фенольных и жирных кислот [33]. Гидроксильные группы фенолукислот дериватизацией не затрагиваются, что позволяет переводить их молекулы в ионную форму и количественно сохранять в водно-спиртовом щелочном растворе на стадии экстракции толуолом.

В то же время, степень извлечения метиловых эфиров жирных кислот (C_{12} – C_{26}) при используемом фазовом отношении ($r = 20$), по нашей оценке, составляет не менее 97–98 %. Выделенные в экстракт эфиры жирных кислот далее анализируют методом ГХ-ПИД (рис. 3).

Получаемые эфиры будут характеризовать, в том числе, и жирнокислотный профиль липидов растений, поскольку параллельно с реакцией этерификации протекает переэтерификация липидов в соответствующие эфиры жирных кислот [33].

Оставшиеся в водно-спиртовом растворе фенольные кислоты сначала экстрагируют

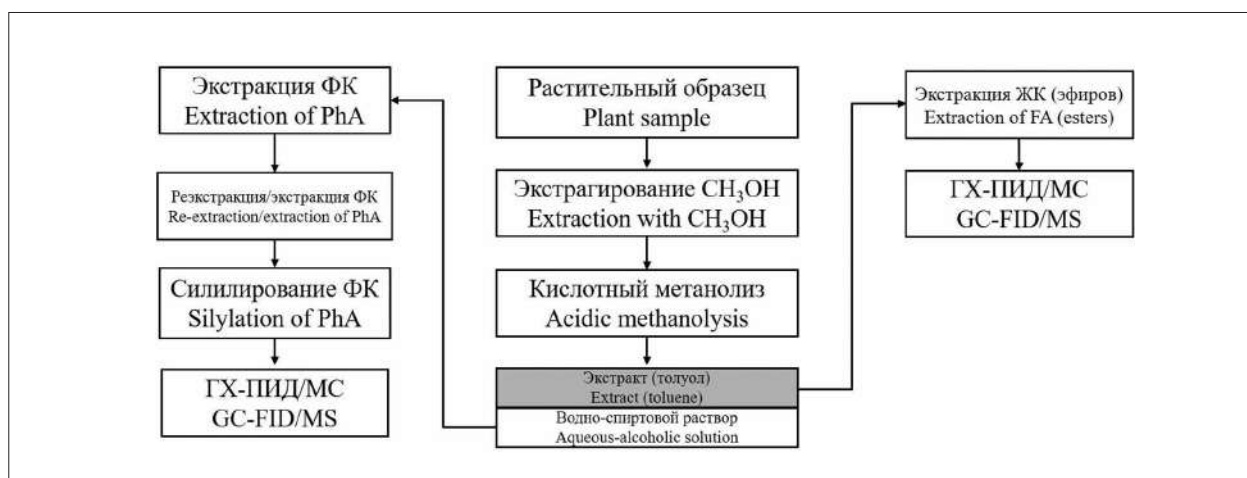


Рис. 1. Аналитический цикл при одновременном определении жирных (ЖК) и фенольных кислот (ФК) в растительных материалах

Fig. 1. Analytical cycle for simultaneous detection of fatty (FA) and phenolic (PhA) acids in plant raw materials

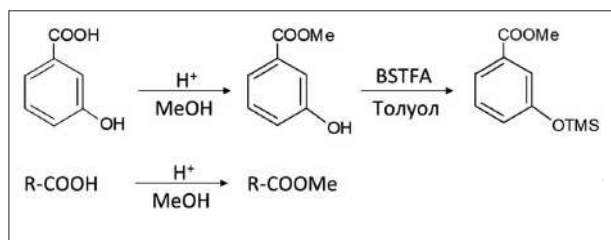


Рис. 2. Двухстадийная химическая модификация при определении жирных и фенольных кислот; Me – метильная группа, TMS – триметилсилильная группа

Fig. 2. Two-step chemical modification for fatty and phenolic acids detection;

Me – methyl group, TMS – trimethylsilyl group

большим объёмом толуола и из полученного экстракта реэкстрагируют кислоты в щелочной раствор малого объёма (рис. 1). В результате этих операций происходит не только значительное концентрирование фенолкислот, но и устраняется мешающее влияние сопутствующих компонентов не кислотной природы [55]. Выделенные в экстракт фенолкислоты после силилирования по гидроксильной группе определяют методом ГХ-ПИД (рис. 2, 3). Следует отметить, что проведение химической модификации фенолкислот по гидроксильной группе перед газохроматографическим определением является обязательной процедурой, поскольку в исходной форме такие соединения характеризуются низкой летучестью и высокой термолабильностью [28].

Важнейший этап количественного химического анализа любых твёрдых матриц – стадия экстрагирования аналитов с целью максимально полного извлечения их из образца. Степень экстрагирования определяется целым рядом факторов, к важнейшим из которых относятся свойства растворителя и экстрагируемых соединений, длительность экстракции, массовое соотношение экстрагента и образца при экстракции [56, 57].

Применение низших алифатических спиртов (метанол и его ближайшие гомологи) и их смесей с водой обеспечивает высокую эффективность извлечения полярных органических веществ из твёрдых матриц, что связывают с наличием как неполярной части, представленной углеводородным радикалом, так и полярного центра (гидроксильная группа) [58]. При использовании в качестве экстрагентов кетонов, простых эфиров, ароматических углеводородов, алканов и их галогенпроизводных – именно метанол демонстрирует макси-

мальную степень извлечения органических кислот (рис. 4).

Следует отметить, что эффективность извлечения кислот возрастает в ряду: гексан → бензол → диметилкетон → диэтиловый эфир → хлористый метилен → метанол, что согласуется с увеличением в этом же ряду индекса полярности этих растворителей [59].

Нами показано, что оптимизированные ранее условия извлечения фенолкислот из растений метанолом [41] могут быть применены и для экстрагирования алифатических карбоновых кислот. Степень извлечения жирных кислот из растительных материалов также достигает максимальных значений при продолжительности экстрагирования не менее 30 мин и массовом соотношении экстрагент/образец в интервале от 10 до 15 (рис. 5).

Определение органических кислот в растительных образцах. На основе предложенного подхода и проведённых исследований по оптимизации стадий экстракции и дериватизации разработана методика одновременного определения жирных кислот и фенолкарбоновых кислот в растительных материалах (рис. 1). Методика была опробована при определении содержания фенольных и жирных кислот в плодах разных интродуцированных видов и сортов рода *Sorbus*, представленных в научной коллекции Ботанического сада ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (табл. 1).

В исследованных плодах десяти интродуцентов рода *Sorbus* методом хромато-масс-спектрометрии было идентифицировано 18 жирных кислот и 7 фенольных кислот (табл. 2, 3).

Среди жирных кислот доминируют их ненасыщенные представители – линолевая, олеиновая и линоленовая кислоты (табл. 2), входящие в группу незаменимых ω -кислот.

Среднее содержание ω -кислот в исследованных образцах составляет 2–3 мг/г, исключая сорта «Алая крупная», «Титан» и «Гранат», где их в 3–5 раз меньше. Содержание фенолкислот в плодах исследуемых интродуцентов в 2–8 раз ниже по сравнению с высшими карбоновыми кислотами (табл. 3). В плодах рябины преобладают кофейная и оксикоричная кислоты, в меньших количествах представлены феруловая и гидроксибензойные кислоты.

Наиболее богаты фенольными кислотами плоды рябины сорта «Гранат» и *S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis*. В плодах сортов «Алая крупная» и «Титан» содержание фенолкислот в 2–3 раза ниже (табл. 3).

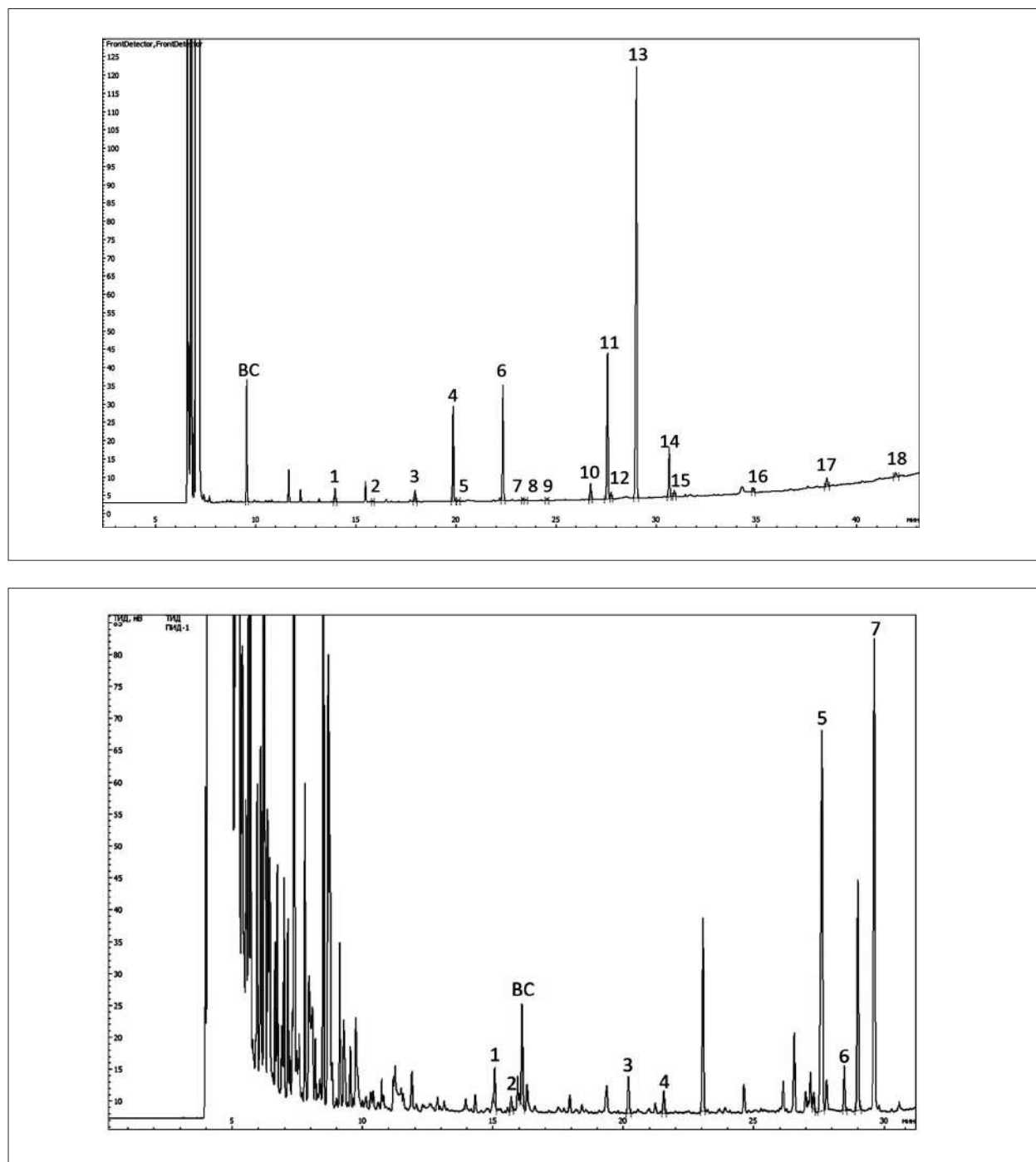


Рис. 3. Хроматограмма экстракта жирных кислот плодов рябины *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* (вверху) и экстракта фенольных кислот плодов рябины сорта «Гранат» (внизу); нумерация пиков на хроматограммах приведена в соответствии с таблицами 2 и 3

Fig. 3. Chromatogram of the fatty acid extract of *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* berries (top) and the phenolic acid extract of *Sorbus* 'Granat' variety berries (below); the peak numbers in the chromatograms are given in accordance with Tables 2 and 3

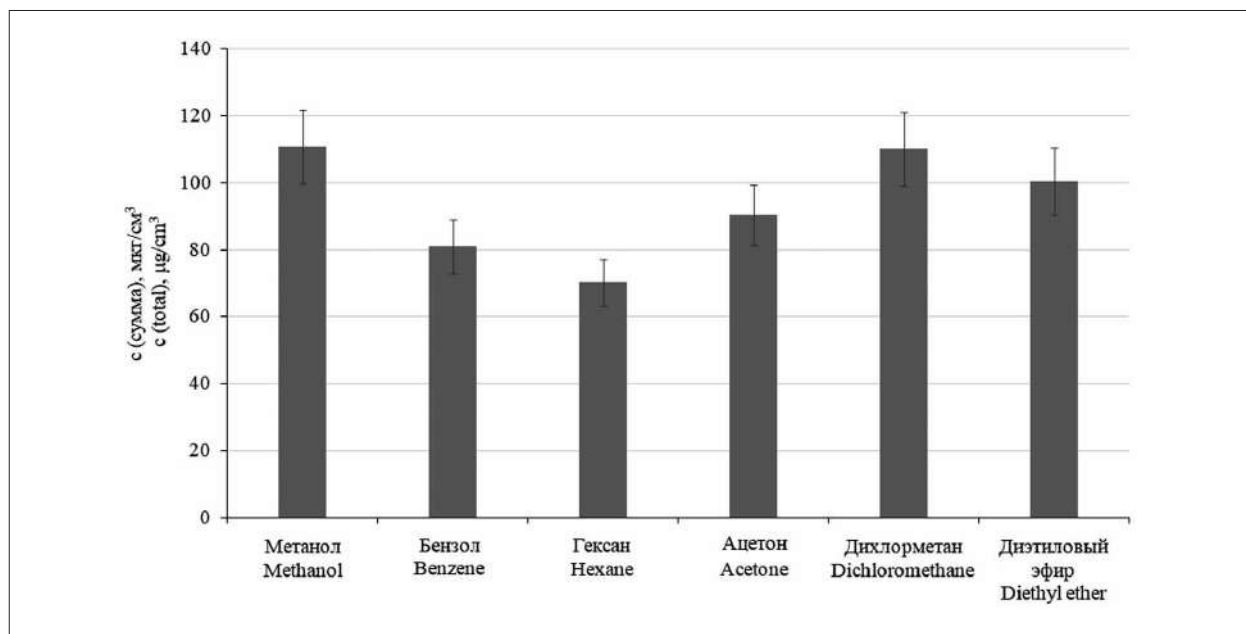


Рис. 4. Зависимость концентрации жирных кислот в экстракте из плодов *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* от применяемого экстрагента
Fig. 4. Dependence of the fatty acids concentration in the *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* berries' extract on the extractant used

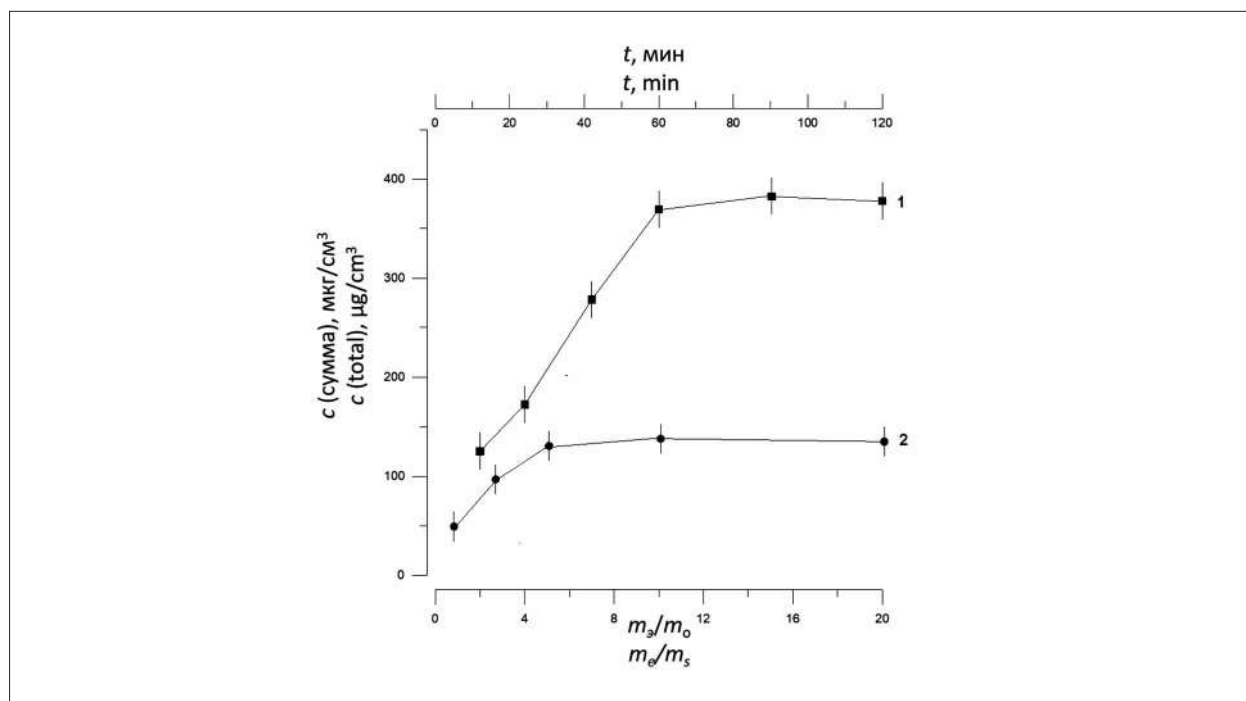


Рис. 5. Зависимость концентрации жирных кислот в экстракте из плодов *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* при экстрагировании метанолом от массового соотношения экстрагент/образец (1) и времени механического перемешивания (2)
Fig. 5. Dependence of the concentration of fatty acids in the *Sorbus aucuparia* subsp. *glabrata* berries' extract during extraction with methanol on the mass ratio of extractant/sample (1) and the time of mechanical stirring (2)

Таблица 1 / Table 1

Интродуцируемые представители рода *Sorbus* / Introduced representatives of the *Sorbus* genus

№	Название таксона* The name of the taxon*	Происхождение образца The origin of the sample
1	<i>Sorbus americana</i>	Дрезден / Dresden
2	Сорт «Алая крупная» / «Alaya Krupnaya» variety	Мичуринск / Michurinsk
3	Сорт «Титан» / «Titan» variety	Мичуринск / Michurinsk
4	<i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>glabrata</i>	Петрозаводск / Petrozavodsk
5	<i>Sorbus commixta</i>	Петрозаводск / Petrozavodsk
6	<i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>pohuashanensis</i>	Латвия / Latvia
7	<i>Sorbus aucuparia</i> subsp. <i>pohuashanensis</i>	Таллин / Tallinn
8	<i>S. aucuparia</i>	Дендропарк «ЛОСС» / Arboretum «LOSS»
9	Сорт «Гранат» / «Granat» variety	Саратов / Saratov
10	Сорт «Рубиновая» / «Rubinovaya» variety	Мичуринск / Michurinsk

Примечание: * – по номенклатуре World Flora Online (<http://www.worldfloraonline.org>).Note: * – according to the World Flora Online nomenclature (<http://www.worldfloraonline.org>).

Таблица 2 / Table 2

Результаты количественного химического анализа жирных кислот (плоды рябины)

Results of fatty acids' quantitative chemical analysis (*Sorbus* berries)

№	Соединение Compound	Содержание соединения в образце, мкг/г / Compound content in the sample, µg/g									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	C12:0	44,5*	27,3	39,2	55,7	104,4	123,4	54,1	94,2	36,3	70,3
2	C13:0	1,8	3,0	0,7	5,9	6,9	4,7	9,4	7,1	1,2	3,7
3	C14:0	61,4	24,3	22,9	49,7	104,8	131,3	64,7	89,5	30,4	54,9
4	C7:2	1479,1	1383,0	900,5	416,5	421,7	675,8	1339,8	493,2	1150,7	638,8
5	C15:0	6,0	3,5	3,5	6,5	8,6	9,7	5,2	8,7	2,7	5,2
6	C16:0	464,3	216,6	214,7	558,6	804,9	866,8	464,2	765,8	201,0	417,4
7	C16:1 (9c)	10,2	3,5	4,5	10,2	20,0	22,3	17,8	23,5	3,4	9,2
8	i-C17:0	4,6	7,4	7,5	5,9	2,9	7,3	4,5	3,5	10,5	7,7
9	C17:0	10,0	4,7	13,9	8,7	15,7	13,9	9,3	16,4	2,8	8,2
10	C18:0	94,0	44,8	25,8	83,3	140,4	156,9	90,2	149,4	31,0	75,6
11	C18:1 (9c)	391,4	88,2	125,3	764,5	1415,3	1044,9	593,3	1208,8	151,7	580,9
12	C18:1 (11c)	24,3	13,9	15,3	28,3	48,2	36,6	24,8	37,5	12,4	17,7
13	C18:2 (9c,12c)	1132,5	351,5	363,8	2372,3	3926,2	2779,3	1595,0	3076,7	521,2	1499,1
14	C18:3 (6c,9c,12c)	252,8	90,7	76,2	247,1	322,6	280,9	184,9	293,9	70,7	117,4
15	C20:0	33,6	19,5	12,0	33,0	50,1	65,3	34,2	57,4	14,0	26,3
16	C22:0	32,4	16,7	9,4	28,4	37,4	46,9	25,0	34,9	9,8	20,3
17	C24:0	45,5	21,4	15,3	54,2	35,7	47,4	44,3	38,4	7,1	19,9
18	C26:0	28,0	18,5	29,6	29,4	21,2	26,7	29,3	27,5	11,9	16,7

Примечание к таблицам 2, 3: * – виды и сорта рябины (1–10) указаны в соответствии с таблицей 1.

Note to tables 2, 3: * – *Sorbus* types and varieties (1–10) are indicated in accordance with Table 1.

Антиоксидантная активность экстрактов плодов представителей рода *Sorbus*. Показано, что антирадикальная активность (АРА) экстрактов плодов рябины в тестах с DPPH и ABTS существенно зависит от вида и сорта (рис. 6).

Наибольшей активностью отличались образцы 7 и 8 (*S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis* (Таллин), *S. aucuparia* (ЛОСС)). Низкая активность отмечена для образца 2 (сорт «Алая

крупная»). Результаты, полученные в этих тестах, статистически значимо коррелировали между собой ($r = 0,927$, $p = 0,001$). Отметим, что в тесте со стабильным радикалом DPPH все исследуемые образцы экстрактов превосходили растворы чистых фенольных кислот, выбранных в качестве стандарта (галловой и 4-гидроксикоричной), что свидетельствует о присутствии в экстрактах более активных компонентов.

Таблица 3 / Table 3

Результаты количественного химического анализа фенольных кислот (плоды рябины)
Results of phenolic acids' quantitative chemical analysis (*Sorbus* berries)

№	Соединение Compound	Содержание соединения в образце, мкг/г Compound content in the sample, µg/g									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<i>p</i> -Гидроксibenзойная кислота <i>p</i> -Hydroxybenzoic acid	32,3*	24,9	10,7	18,2	36,3	39,8	28,5	40,5	30,2	54,3
2	<i>o</i> -Гидроксibenзойная кислота <i>o</i> -Hydroxybenzoic acid	10,7	23,7	7,7	10,1	9,9	22,2	26,7	12,7	18,4	21,7
3	Ванилиновая кислота Vanillic acid	17,7	16,3	15,7	4,7	6,4	6,1	11,4	1,6	37,7	8,7
4	3,4-дигидроксibenзойная кислота 3,4-dihydroxybenzoic acid	3,0	4,6	7,0	4,0	4,7	17,1	7,6	9,5	22,2	16,1
5	Оксикоричная кислота Oxycoric acid	520,8	243,2	165,8	226,6	352,7	380,5	335,2	321,2	405,6	354,1
6	Феруловая кислота Ferulic acid	76,2	38,2	28,1	49,7	69,3	78,0	90,4	64,0	46,8	40,4
7	Кофейная кислота Caffeic acid	213,3	28,1	77,7	38,7	40,0	304,6	564,4	121,1	476,9	196,7

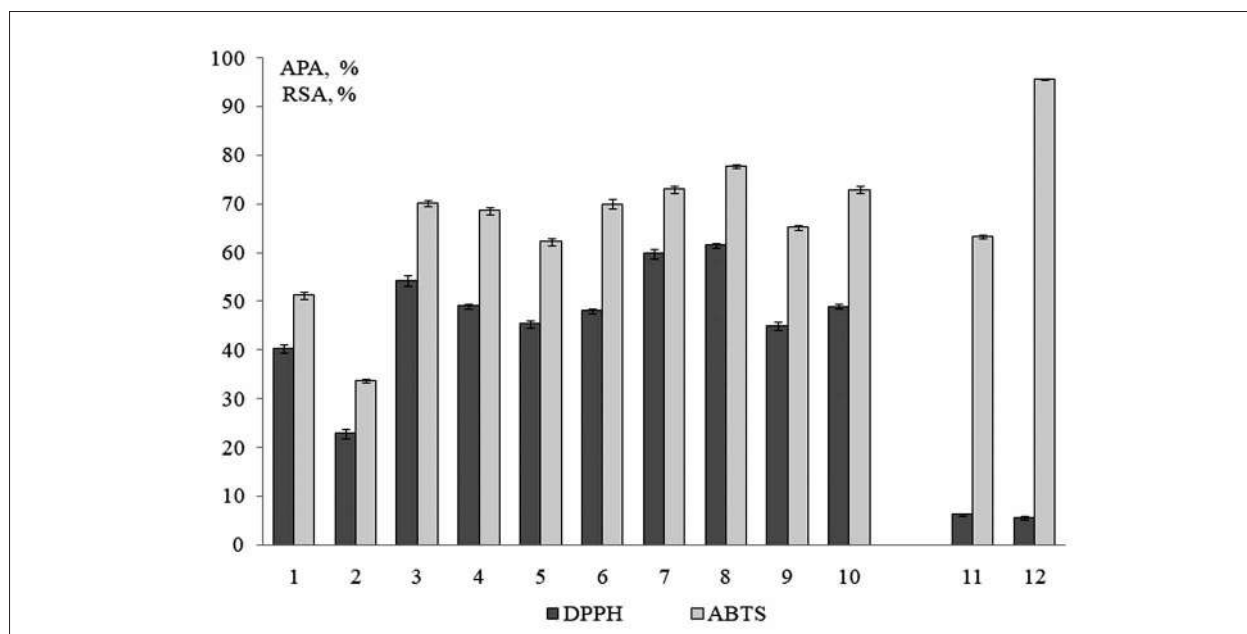


Рис. 6. Антирадикальная активность (АРА) экстрактов рябины в концентрации 0,05 мг/см³ в тестах с DPPH и ABTS (здесь и на рисунке 7: 1–10 в соответствии с таблицей 1, 11 – галловая кислота, 12 – гидроксикоричная кислота)

Fig. 6. Radical scavenging activity (RSA) of *Sorbus* extracts at 0.05 mg/cm³ concentration in tests with DPPH and ABTS (here and in Figure 7: 1–10 according to Table 1, 11 – gallic acid, 12 – hydroxycinnamic acid)

Высокая АРА экстрактов плодов рябины подтверждается и в тестах на модели Fe^{2+} /аскорбат-инициированного ПОЛ в эмульсии, содержащей легкоокисляемые липиды головного мозга лабораторных животных (рис. 7). Оценивали способность образцов ингибировать накопление ТБК-АП в субстрате через 1 ч после Fe^{2+} /аскорбат-инициированного ПОЛ. Все исследуемые экстракты статистически значимо ингибировали накопление в субстрате вторичных продуктов ПОЛ (ТБК-АП) по сравнению с контролем ($p = 0,021$). Наибольшей активностью в обеих концентрациях (0,05 и 0,2 мг/см³) обладали образцы 7 (*S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis* (Таллин) и 10 (сорт «Рубиновая»). Мощную ингибирующую активность образца 7 можно связать с присутствием в нём значительных количеств феруловой и кофейной кислот (табл. 3), известных высокой антиоксидантной активностью [49, 60].

Высокая антиоксидантная активность образца 10, вероятно, связана с присутствием в экстракте иных, не идентифицированных в настоящем исследовании соединений, к числу которых могут относиться каротиноиды, антоцианы и пр.

Известно, что фенольные кислоты существенно различаются между собой как по антирадикальной активности, так и по способности ингибировать инициированное окисление модельного субстрата, в том числе в дисперсных системах. Так, в настоящем исследовании галловая кислота, в отличие от 4-гидроксико-

ричной (*пара*-кумаровой), проявила слабую антиоксидантную активность на модели Fe^{2+} /аскорбат-инициированного ПОЛ (рис. 7).

Низкая эффективность галловой кислоты в дисперсных системах (эмульсиях «масло в воде»), обусловленная её высокой полярностью и преимущественной локализацией в водной фазе, подтверждается данными литературы [10, 61, 62].

Очевидно, что антиоксидантная активность многокомпонентных растительных экстрактов, особенно в сложных тест-системах, не может быть обусловлена присутствием одних лишь фенольных кислот вследствие наличия других, неидентифицированных соединений (пигментов, многоядерных фенолов и др.), также способных участвовать в регуляции свободно-радикальных процессов, выступать в роли синергистов и прооксидантов.

Тем не менее, результаты анализа, полученные методом газовой хроматографии, позволяют выделить наиболее ценные в отношении содержания в плодах фенольных и жирных кислот сорта и виды рябины, к которым относятся *S. aucuparia* subsp. *pohuashanensis*, отличающиеся и высокой антиоксидантной активностью.

Заключение

Для отдельного определения высших карбоновых кислот (C_{12} – C_{24}) и фенолкислот (2- и 4-гидроксibenзойная, 3,4-дигидрокси-

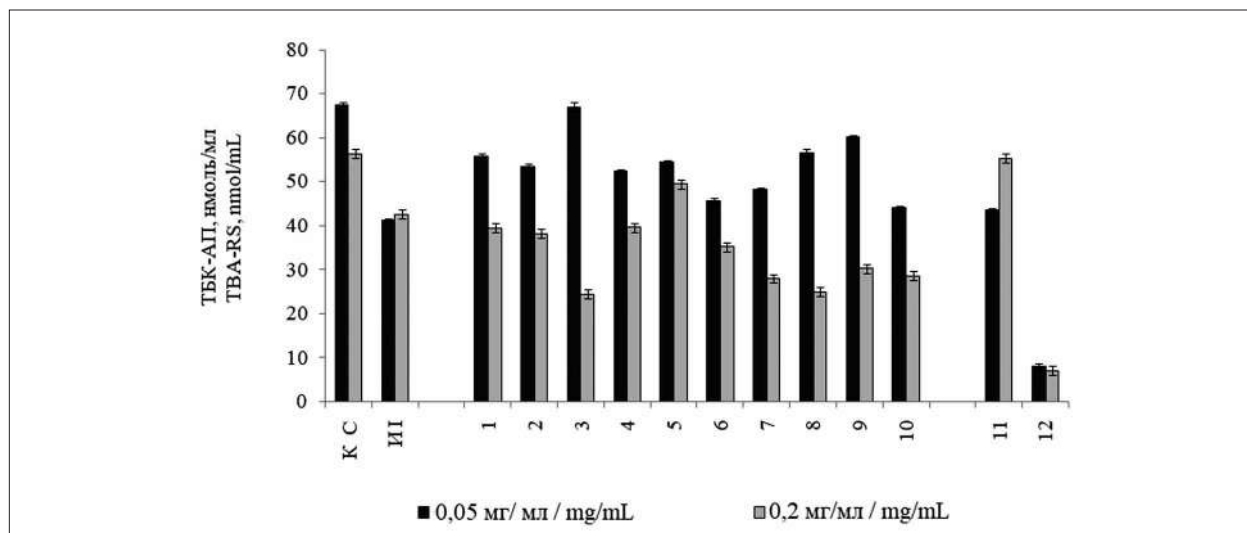


Рис. 7. Антиоксидантная активность экстрактов рябины в концентрации 0,05 и 0,2 мг/мл в субстрате на основе липидов головного мозга животных. Контроль (К) – образцы без тестируемых экстрактов, интактные (И) – образцы, в которых инициирование окисления не проводили

Fig. 7. Antioxidant activity of *Sorbus* extracts at concentrations of 0.05 and 0.2 mg/mL in a substrate based on animal brain lipids. Control (C) – samples without the tested extracts, intact (I) – samples without initiated oxidation

бензойная, ванилиновая, оксикоричная, феруловая и кофейная кислота) при их совместном присутствии в растительных материалах разработана экстракционно-хроматографическая методика, при реализации аналитического цикла которой происходит полное отделение соединений этих двух классов органических кислот. Идентификацию и количественное определение кислот проводят газохроматографическими методами с масс-селективным или пламенно-ионизационным детектором. Проведена оптимизация условий экстракционного извлечения кислот из растительных материалов, дериватизации и газохроматографического определения полученных производных. Диапазон определяемых содержаний органических кислот составляет 0,0005–0,5 мг/г, относительная погрешность – 10–15 %, масса навески – 0,5 г, общая продолжительность анализа – 4 ч.

Апробация методики проведена на плодах разных видов и сортов рода *Sorbus*, широко представленных в научной коллекции Ботанического сада ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. В экстрактах из плодов рябины методом газовой хроматографии с масс-селективным детектором были идентифицировано 18 жирных и 7 фенольных кислот. Выявлены образцы (*S. aucuparia* subsp. *pohuashane*), сочетающие высокое содержание феруловой и кофейной кислот с выраженной антиоксидантной активностью. Разработанная методика на основании анализа широкого круга важнейших органических кислот позволяет делать обоснованные выводы о перспективности селекции или интродукции дикорастущих и культивируемых растений.

Настоящая статья не содержит описания исследований с использованием в качестве объектов животных и людей. Экспериментальная работа с использованием тканей интактных мышей (in vitro) одобрена комиссией по биоэтике Института биологии Коми НЦ УрО РАН, протокол № 5 от 16.04.2024 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Оценка влияния климатических условий Севера на процессы репродукции ресурсных растений» (№ 125021302139-3). Образцы плодов рябины получены из УНУ «Научная коллекция живых растений Ботанического сада Института биологии Коми НЦ УрО РАН» (№ 507428). Определение химического состава образцов проведено на оборудовании ЦКП «Хроматография» (№ 3297). Исследование антиоксидантной активности экстрактов плодов рябины выполнено на базе

ЦКП «Молекулярная биология», в работе использованы мыши из научной коллекции экспериментальных животных Института биологии Коми НЦ УрО РАН (<https://ckp-rf.ru/usu/471933/>).

References

1. Gabrielyan E.Ts. Rowan trees (*Sorbus* L.) of Western Asia and the Himalayas. Erevan: Izdatelstvo AN ArmSSR, 1978. 264 p. (in Russian).
2. Zaikonnikova T.I. Arctic flora of the USSR. Leningrad: Nauka, 1984. 118 p. (in Russian).
3. Petrov E.M. Rowan. M.: Selkhozgiz, 1957. 257 p. (in Russian).
4. Komarov V.L. Flora of the USSR. Moskva: Izdatelstvo AN SSSR, 1939. V. 8. 235 p. (in Russian).
5. Tolmachev A.I. Flora of the North-Eastern European part of the USSR. Leningrad: Nauka, 1976. V. 3. 107 p. (in Russian).
6. Sokolov P.D. Plant resources of the USSR. Flowering plants, their chemical composition, and use. Families of Hydrangeaceae – Haloragaceae. Leningrad: Nauka, 1987. 326 p. (in Russian).
7. Fomenko S.E., Kushnerova N.F., Srygin V.G., Drugova E.S., Momot T.V. Chemical composition and biological activity of the rowanberry extract // Chemistry of plant raw material. 2015. V. 2. P. 161–168 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.201502571
8. Ivanova S.V., Shelepova O.V., Kirichenko E.B. Microelement composition of common mountain ash fruits (*Sorbus aucuparia* L.) // Vestnik of the Orenburg State University. 2005. No. 2S-2(40). P. 9–10 (in Russian).
9. MikulicPetkovsek M., Krska B., Kiproviski B., Veberic R. Bioactive components and antioxidant capacity of fruits from nine *Sorbus* genotypes // J. Food Sci. 2017. V. 82. No. 3. P. 647–658. doi: 10.1111/1750-3841.13643
10. Farhoosh R., Johnny S., Asnaashari M., Molaahmadibahraseman N., Sharif A. Structure–antioxidant activity relationships of *o*-hydroxyl, *o*-methoxy, and alkyl ester derivatives of *p*-hydroxybenzoic acid // Food Chem. 2016. V. 194. P. 128–134. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.08.003
11. Chen J., Yang J., Ma L., Li J., Shahzad N., Kim C.K. Structure–antioxidant activity relationship of methoxy, phenolic hydroxyl, and carboxylic acid groups of phenolic acids // Sci. Rep. 2020. V. 10. No. 1. Article No. 2611. doi: 10.1038/s41598-020-59451-z
12. Saini R.K., Keum Y.-S. Omega-3 and omega-6 polyunsaturated fatty acids: dietary sources, metabolism, and significance – a review // Life Sci. 2018. V. 203. P. 255–267. doi: 10.1016/j.lfs.2018.04.049
13. Vázquez L., Corzo-Martínez M., Arranz-Martínez P., Barroso E., Reglero G., Torres C.F. Bioactive lipids // Bioactive molecules in food / Eds. J.-M. Mérillon, K.G. Ramawat. Cham: Springer, 2019. P. 467–527. doi: 10.1007/978-3-319-78030-6_58

14. Gladyshev M.I. Essential polyunsaturated fatty acids and their dietary sources for man // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2012. V. 5. No. 4. P. 352–386 (in Russian).
15. Lobayeva T.A. Study of the composition and content of fatty acids in herbal remedies // RUDN journal of medicine. 2015. No. 2. P. 9–18 (in Russian).
16. Harwood J.L. Recent advances in the biosynthesis of plant fatty acids // Biochim. Biophys. Acta, Lipids Lipid Metab. 1996. V. 1301. No. 1–2. P. 7–56. doi: 10.1016/0005-2760(95)00242-1
17. Arceusz A., Wesolowski M., Konieczynski P. Methods for extraction and determination of phenolic acids in medicinal plants: a review // Nat. Prod. Commun. 2013. V. 8. No. 12. P. 1821–1829. doi: 10.1177/1934578X1300801238
18. Wu Z., Zhang Q., Li N., Pu Y., Wang B., Zhang T. Comparison of critical methods developed for fatty acid analysis: a review // J. Sep. Sci. 2017. V. 40. No. 1. P. 288–298. doi: 10.1002/jssc.201600707
19. Lima-Pereira Y., de Souza E.M.O., dos Reis D.S., Barcellos-Silva I.G.C., Miki K.S.L., Veiga-Júnior V.F., Teixeira-Costa B.E. Current perspectives on the extraction, isolation, and identification of fats and fatty acids using conventional and green methods // Separations. 2025. V. 12. No. 6. Article No. 160. doi: 10.3390/separations12060160
20. Edo G.I., Nwachukwu S.C., Ali A.B.M., Yousif E., Jikah A.N., Zainulabdeen K., Ekokotu H.A., Isoje E.F., Igbuku U.A., Opiti R.A., Akpogheli P.O., Owhero J.O., Essagah A.E.A. A review on the composition, extraction and applications of phenolic compounds // Ecol. Front. 2025. V. 45. No. 1. P. 7–23. doi: 10.1016/j.ecofro.2024.09.008
21. Ruiz-Rodriguez A., Reglero G., Ibañez E. Recent trends in the advanced analysis of bioactive fatty acids // J. Pharm. Biomed. Anal. 2010. V. 51. No. 2. P. 305–326. doi: 10.1016/j.jpba.2009.05.012.
22. Becerra-Herrera M., Lazzoi M.R., Sayago A., Beltrán R., del Sole R., Vasapollo G. Extraction and determination of phenolic compounds in the berries of *Sorbus americana* Marsh and *Lonicera oblongifolia* (Goldie) Hook // Food Anal. Methods. 2015. V. 8. No. 10. P. 2554–2559. doi: 10.1007/s12161-015-0151-5
23. Cui H., Zhou J., Xu F., Lai C.Z., Wan G.H. Determination of phenolic compounds using high-performance liquid chromatography with Ce⁴⁺-Tween 20 chemiluminescence detection // Anal. Chim. Acta. 2004. V. 511. No. 2. P. 273–279. doi: 10.1016/j.aca.2004.01.046
24. Kivilompolo M., Obürka V., Hyötyläinen T. Comparison of GC–MS and LC–MS methods for the analysis of antioxidant phenolic acids in herbs // Anal. Bioanal. Chem. 2007. V. 388. No. 4. P. 881–887. doi: 10.1007/s00216-007-1298-8
25. Simirgiotis M.J., Silva M., Becerra J., Schmeda-Hirschmann G. Direct characterisation of phenolic antioxidants in infusions from four Mapuche medicinal plants by liquid chromatography with diode array detection (HPLC–DAD) and electrospray ionisation tandem mass spectrometry (HPLC–ESI–MS) // Food Chem. 2012. V. 131. No. 1. P. 318–327. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.07.118
26. Ribas-Agustí A., Gratacós-Cubarsí M., Sárraga C., García-Regueiro J.-A., Castellari M. Analysis of eleven phenolic compounds including novel *p*-coumaroyl derivatives in lettuce (*Lactuca sativa* L.) by ultra-high-performance liquid chromatography with photodiode array and mass spectrometry detection // Phytochem. Anal. 2011. V. 22. No. 6. P. 555–563. doi: 10.1002/pca.1318
27. Barros L., Dueñas M., Ferreira I.C.F.R., Baptista P., Santos-Buelga C. Phenolic acids determination by HPLC–DAD–ESI/MS in sixteen different Portuguese wild mushrooms species // Food Chem. Toxicol. 2009. V. 47. No. 6. P. 1076–1079. doi: 10.1016/j.fct.2009.01.039
28. Gruzdev I.V., Zenkevich I.G., Kondratenok B.M. Derivatization in gas chromatographic determination of phenol and aniline traces in aqueous media // Russ. Chem. Rev. 2015. V. 84. No. 6. P. 653–664. doi: 10.1070/RCR4553
29. Parkinson D.R. Analytical derivatization techniques // Reference module in chemistry, molecular sciences and chemical engineering. Elsevier, 2014. 38 p. doi: 10.1016/b978-0-12-409547-2.11454-4
30. Moidoveanu S.C., David V. Derivatization reactions for analytes with various functional groups // Journal of chromatography library. Sample preparation in chromatography / Eds. S.C. Moidoveanu, V. David. Elsevier, 2002. V. 65. P. 639–845. doi: 10.1016/S0301-4770(02)80020-3
31. Smolarz H.D. Application of GC–MS method for analysis of phenolic acids and their esters in chloroformic extracts from some taxons of *Polygonum* L. genus // Chem. Anal. 2001. V. 46. No. 3. P. 439–444.
32. Citová I., Sladkovský R., Solich P. Analysis of phenolic acids as chloroformate derivatives using solid phase microextraction–gas chromatography // Anal. Chim. Acta. 2006. V. 573–574. P. 231–241. doi: 10.1016/j.aca.2006.04.077
33. Ichihara K., Fukubayashi Y. Preparation of fatty acid methyl esters for gas-liquid chromatography // J. Lipid Res. 2010. V. 51. No. 3. P. 635–640. doi: 10.1194/jlr.D001065.
34. Ifeanchio M.O., Ikewuchi C.C., Ikewuchi J.C. Investigation of the profile of phenolic compounds in the leaves and stems of *Pandiaka heudelotii* using gas chromatography coupled with flame ionization detector // Food Sci. Nutr. 2016. V. 5. No. 3. P. 646–652. doi: 10.1002/fsn3.443
35. Schummer C., Delhomme O., Appenzeller B.M.R., Wennig R., Millet M. Comparison of MTBSTFA and BSTFA in derivatization reactions of polar compounds prior to GC/MS analysis // Talanta. 2009. V. 77. No. 4. P. 1473–1482. doi: 10.1016/j.talanta.2008.09.043

36. Young R.F., Coy D.L., Fedorak P.M. Evaluating MTBSTFA derivatization reagents for measuring naphthenic acids by gas chromatography–mass spectrometry // *Anal. Methods*. 2010. V. 2. No. 6. P. 765–770. doi: 10.1039/c0ay00014k
37. Proestos C., Boziaris I.S., Nychas G.-J.E., Komaitis M. Analysis of flavonoids and phenolic acids in Greek aromatic plants: investigation of their antioxidant capacity and antimicrobial activity // *Food Chem.* 2006. V. 95. No. 4. P. 664–671. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.01.049
38. Proestos C., Sereli D., Komaitis M. Determination of phenolic compounds in aromatic plants by RP-HPLC and GC-MS // *Food Chem.* 2006. V. 95. No. 1. P. 44–52. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.12.016
39. Orata F. Derivatization reactions and reagents for gas chromatography analysis // *Advanced gas chromatography – progress in agricultural, biomedical and industrial applications* / Ed. M.M. Rijeka. IntechOpen, 2012. P. 83–108. doi: 10.5772/33098
40. Özcan M.M., Al Juhaimi F., Ahmed I.A.M., Babiker E.E., Ghafoor K. Antioxidant activity, fatty acid composition, phenolic compounds and mineral contents of stem, leave and fruits of two morphs of wild myrtle plants // *Food Measure*. 2020. V. 14. No. 3. P. 1376–1382. doi: 10.1007/s11694-020-00387-3
41. Gruzdev I.V., Veber N.E., Skrotskaya O.V. Isolation and determination of phenolic acids in rowanberry fruits (*Sorbus* L.) by gas chromatography // *Analytics and control*. 2024. V. 28. No. 2. P. 87–97 (in Russian). doi: 10.15826/analitika.2024.28.2.002
42. Platonova E.Yu., Golubev D.A., Zemskaya N.V., Shevchenko O.G., Patov S.A., Shaposhnikov M.V., Moskalev A.A. The antioxidant and geroprotective properties of an extract of mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) fruits // *Mol. Biol.* 2023. V. 57. No. 6. P. 978–992. doi: 10.1134/S0026893323060134
43. Mikhailova D.V., Shevchenko O.G., Golubev D.A., Platonova E.Y., Zemskaya N.V., Shoeva O.Y., Gordeeva E.I., Patov S.A., Shaposhnikov M.V., Khlestkina E.K., Moskalev A.A. Antioxidant properties and geroprotective potential of wheat bran extracts with increased content of anthocyanins // *Antioxidants*. 2023. V. 12. No. 11. Article No. 2010. doi: 10.3390/antiox12112010
44. Golubev D., Platonova E., Zemskaya N., Shevchenko O., Shaposhnikov M., Nekrasova P., Patov S., Ibragimova U., Valuisky N., Borisov A., Zhukova X., Sorokina S., Litvinov R., Moskalev A. *Berberis vulgaris* L. extract supplementation exerts regulatory effects on the lifespan and healthspan of *Drosophila* through its antioxidant activity depending on the sex // *Biogerontology*. 2024. V. 25. No. 3. P. 507–528. doi: 10.1007/s10522-023-10083-6
45. Shevchenko O.G. Investigation of certain aspects of the studies of antioxidants in heterogeneous systems, oil-in-water emulsions // *Russ. Chem. Bull.* 2024. V. 73. No. 12. P. 3471–3486. doi: 10.1007/s11172-024-4464-7
46. Günter E.A., Popeyko O.V., Shevchenko O.G., Vityazev F.V., Modification of texture and *in vitro* digestion of pectin and κ-carrageenan food hydrogels with antioxidant properties using plant cells // *Int. J. Biol. Macromol.* 2025. V. 316. Article No. 144682. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2025.144682
47. Adaeva O.I., Demchuk D.V., Shevchenko O.G., Semenova M.N., Semenov V.V. Apiol from parsley seeds as a source for the synthesis of coenzyme Q₀ propanoic acid conjugates with amines featuring antioxidant activity // *ACS Omega*. 2026. V. 11. No. 18. P. 26195–26205. doi: 10.1021/acsomega.5c09328
48. Sevgi K., Tepe B., Sarikurkcu C. Antioxidant and DNA damage protection potentials of selected phenolic acids // *Food Chem. Toxicol.* 2015. V. 77. P. 12–21. doi: 10.1016/j.fct.2014.12.006
49. Celik S.E., Ozyürek M., Güçlü K., Apak R. Solvent effects on the antioxidant capacity of lipophilic and hydrophilic antioxidants measured by CUPRAC, ABTS/persulphate and FRAP methods // *Talanta*. 2010. V. 81. No. 4–5. P. 1300–1309. doi: 10.1016/j.talanta.2010.02.025
50. Boulebd H., Zine Y., Khodja I.A., Mermer A., Demir A., Debache A. Synthesis and radical scavenging activity of new phenolic hydrazone/hydrazide derivatives: experimental and theoretical studies // *J. Mol. Struct.* 2022. V. 1249. Article No. 131546. doi: 10.1016/j.molstruc.2021.131546
51. Romera-Castillo C., Jaffé R. Free radical scavenging (antioxidant activity) of natural dissolved organic matter // *Mar. Chem.* 2015. V. 177. Pt. 4. P. 668–676. doi: 10.1016/j.marchem.2015.10.008
52. Wu C.R., Lin W.H., Hseu Y.C., Lien J.C., Lin Y.T., Kuo T.P., Ching H. Evaluation of the antioxidant activity of five endemic *Ligustrum* species leaves from Taiwan flora *in vitro* // *Food Chem.* 2011. V. 127. No. 2. P. 564–571. doi: 10.1016/j.foodchem.2011.01.041.
53. Kim J.S. Preliminary evaluation for comparative antioxidant activity in the water and ethanol extracts of dried citrus fruit (*Citrus unshiu*) peel using chemical and biochemical *in vitro* assays // *Food Nutr. Sci.* 2013. V. 4. No. 2. P. 177–188. doi: 10.4236/fns.2013.42025
54. Stefanello S.T., Prestes A.S., Ogunmoyole T., Salman S.M., Schwab R.S., Brender C.R., Dornelles L., Rocha J.B.T., Soares F.A.A. Evaluation of *in vitro* antioxidant effect of new mono and diselenides // *Toxicol. in Vitro*. 2013. V. 27. No. 5. P. 1433–1439. doi: 10.1016/j.tiv.2013.03.001
55. Korenman Ya.I. Extraction of Phenols. Gorkiy: Volgo-Vyatskoe izdatelstvo, 1973. 214 p. (in Russian).
56. Ribeiro C., Ribeiro A.R., Maia A.S., Gonçalves V.M.F., Tiritan M.E. New trends in sample preparation techniques for environmental analysis // *Crit. Rev. Anal. Chem.* 2014. V. 44. No. 2. P. 142–185. doi: 10.1080/10408347.2013.833850
57. Mokrani A., Madani K. Effect of solvent, time and temperature on the extraction of phenolic compounds

and antioxidant capacity of peach (*Prunus persica* L.) fruit // Sep. Purif. Technol. 2016. V. 162. P. 68–76. doi: 10.1016/j.seppur.2016.01.043

58. Acquavia M.A., Pascale R., Foti L., Carlucci G., Scrano L., Martelli G., Brienza M., Coviello D., Bianco G., Lelario F. Analytical methods for extraction and identification of primary and secondary metabolites of apple (*Malus domestica*) fruits: a review // Separations. 2021. V. 8. No. 7. Article No. 91. doi: 10.3390/separations8070091

59. Reichardt C., Welton T. Solvents and solvent effects in organic chemistry. Weinheim: John Wiley & Sons, 2011. 718 p.

60. Jia Y., He Y., Lu F. The structure–antioxidant activity relationship of dehydrodiferulates // Food Chem. 2018. V. 269. P. 480–485. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.07.038

61. Kikuzaki H., Hisamoto M., Hirose A., Akiyama K., Taniguchi H. Antioxidant properties of ferulic acid and its related compounds // J. Agric. Food Chem. 2002. V. 50. No. 7. P. 2161–2168. doi: 10.1021/jf011348w

62. Kiokias S., Proestos C., Oreopoulou V. Phenolic acids of plant origin – a review on their antioxidant activity *in vitro* (O/W emulsion systems) along with their *in vivo* health biochemical properties // Foods. 2020. V. 9. No. 4. Article No. 534. doi: 10.3390/foods9040534

Влияние пиретроидов на биохимические параметры и морфофункциональное состояние живородки речной (*Viviparus viviparus* L.)

© 2026. Е. А. Тишина¹, зав. лабораторией, Т. С. Дроганова¹, ст. преподаватель,
Л. В. Поликарпова¹, н. с., Д. А. Арешидзе², к. б. н., зав. лабораторией,
Н. В. Васильев¹, д. х. н., профессор, зав. кафедрой,

¹Государственный университет просвещения,
141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,

²Научно-исследовательский институт морфологии человека имени академика А.П. Авцына
ФГБНУ «Российский научный центр хирургии имени академика Б.В. Петровского»,
117418, Россия, г. Москва, ул. Цюрупы, д. 3,
e-mail: ecolab@guppros.ru, labcelpat@mail.ru

Исследовано влияние пиретроидов на морфофункциональное состояние и активность фермента обменного комплекса кислой фосфатазы (КФ) в тканях пищеварительной железы (гепатопанкреаса) пресноводного моллюска живородки речной (*Viviparus viviparus* L.). Альфа-циперметрин и лямбда-цигалотрин, применявшиеся в эксперименте, относятся к синтетическим пиретроидам. По механизму действия на насекомых они являются нейротропными веществами и используются в качестве инсектицидов в различных направлениях борьбы с насекомыми. При остром воздействии альфа-циперметрин и лямбда-цигалотрин вызывают увеличение активности КФ в 3–5 раз относительно значений, полученных в контрольной группе животных. При проведении энзим-электрофореза в опытных группах на фоне увеличения активности КФ под действием пиретроидов отмечен синтез новых множественных форм фермента в гепатопанкреасе моллюсков. При оценке морфологического состояния тканей гепатопанкреаса живородки речной отмечено появление клеток в состоянии кариопикноза, кариорексиса, кариолизиса и единичные некротизированные клетки. Полученные результаты активности и изменения в составе множественных форм КФ живородки речной в нормальных условиях и при воздействии альфа-циперметрина и лямбда-цигалотрина свидетельствуют о формировании неспецифической адаптации в ответ на действие пиретроидных пестицидов.

Ключевые слова: эколого-биохимический мониторинг, кислая фосфатаза, альфа-циперметрин, лямбда-цигалотрин, *Viviparus viviparus* L., морфологические изменения гепатопанкреаса.

Pyrethroids effect on biochemical parameters and morphofunctional state of *Viviparus viviparus* L.

© 2026. E. A. Tishina¹ ORCID: 0000-0001-8329-7855, T. S. Drogonova¹ ORCID: 0000-0002-8917-7392,
L. V. Polikarpova¹ ORCID: 0000-0002-5459-3054, D. A. Areshidze² ORCID: 0000-0003-3006-6281,
N. V. Vasiliev¹ ORCID: 0000-0002-8215-6687

¹State University of Education,
24, Very Voloshinoy St., Mytishchi, Russia, 141014,

²Research Institute of Human Morphology named after Academician A.P. Avtsyn FGBNU
“Russian Scientific Center of Surgery named after Academician B.V. Petrovsky”,
3, Tsyurupy St., Moscow, Russia, 117418,
e-mail: ecolab@guppros.ru, labcelpat@mail.ru

The effect of pyrethroids on the morphofunctional state and activity of the acid phosphatase (AcP, enzyme of the metabolic complex) in the digestive gland (hepatopancreas) tissues of the freshwater mollusk *Viviparus viviparus* L. was studied. Used in the experiment alpha-cypermethrin and lambda-cyhalothrin are synthetic pyrethroids. They are neurotropic substances by mechanism of action and are used as insecticides in various insect control directions. At acute exposure both alpha-cypermethrin and lambda-cyhalothrin cause 3–5 times increase of AcP activity relative to the values obtained in the control group of animals. During enzyme electrophoresis in the experimental groups against the background of the

increase in the AcP activity exposed to pyrethroids, synthesis of new multiple forms of the enzyme in the hepatopancreas of mollusks was noted. When assessing the morphological state of hepatopancreas tissues of the *V. viviparus*, the cells with karyopycnosis, karyorexis, karyolysis as well as single necrotised cells were detected. The obtained results of AcP activity and changes in the composition of AcP multiple forms upon exposure and non-exposure to alpha-cypermethrin and lambda-cyhalothrin indicate the formation of non-specific adaptation in response to pyrethroid pesticides.

Keywords: ecological and biochemical monitoring, acid phosphatase, alpha-cypermethrin, lambda-cyhalothrin, *Viviparus viviparus* L., morphological changes of hepatopancreas.

Синтетические пиретроиды в настоящее время являются одними из наиболее распространённых и эффективных пестицидов, которые применяются в самых различных направлениях борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур, в медицинских и ветеринарных целях [1]. По механизму действия на членистоногих соединения из класса пиретроидов являются нейротропными веществами. При попадании в организм они связываются с липофильным окружением мембраны со стороны внутренней створки натриевого канала нервных клеток, что приводит к нарушениям в закрытии и открытии натриевых каналов, и в итоге наступает медленная деполяризация мембран нервных клеток, блокада проводимости, конвульсии, паралич, который приводит к гибели насекомого [2]. Среди синтетических пиретроидов достаточно широко распространены альфа-циперметрин и лямбда-цигалотрин. По характеру действия эти вещества классифицированы как пиретроиды II типа, которые обладают длительной остаточной активностью, более эффективны против широкого спектра насекомых, но вместе с тем сильнее влияют на нецелевые организмы.

Несмотря на низкие нормы расхода пиретроидов при их применении и невысокой токсичности для человека и теплокровных, они представляют опасность для гидробионтов поскольку водные объекты являются итоговым местом накопления пестицидов. Действие синтетических пиретроидов на гидробионтов наиболее изучено на рыбах [3–5] и съедобных моллюсках, например на устрицах [6–11]. Известно определение индекса токсичности циперметрина на водных тест-объектах – инфузориях.

В отечественном исследовании [12], посвящённом действию пестицидов на различные виды гидробионтов (водоросли, дафнии, рыбы), по показателям острой и хронической токсичности синтетические пиретроиды отнесены к числу первых двадцати токсикантов при выборке из более двухсот веществ.

Биохимическое действие пиретроидов на пресноводных моллюсков изучено недостаточно, также как и последствия такого

воздействия. Изучено влияние циперметрина на пресноводную улитку *Chilina parchappi* (d'Orbigny, 1835) – эндемичный вид, обитающий в центральном регионе Аргентины. При этом дана биохимическая оценка гепатопанкреаса и морфофункциональная оценка воздействия [13].

Биохимическое изучение воздействия циперметрина на пресноводных моллюсков средней полосы Евразии изучалось в нашей работе [14] при действии высоких концентраций – 10 ПДК/ОДУ (0,006 мг/л) согласно СанПиН 1.2.3685-21 на моллюска *Viviparus viviparus* L. Эта работа является единственным примером подобного исследования, несмотря на то, что пресноводные брюхоногие моллюски являются важными неотъемлемыми компонентами сообщества гидробионтов в пресноводных экосистемах, где играют ключевую роль, способствуя сохранению биоразнообразия, круговороту питательных веществ и улучшению качества воды.

Моллюск *Viviparus viviparus* L., широко распространённый в Евразии, достаточно часто исследовался по отношению к экотоксикантам из группы тяжёлых металлов и рассматривался в ряде исследований как индикаторный вид при загрязнении водной среды [15–17]. Данный моллюск проявляет высокую реактивность к загрязнениям водной среды и одновременно имеет широкий адаптивный потенциал, что позволяет исследовать его биохимические параметры в широком интервале концентраций веществ [16].

Целью данного исследования является анализ биохимического воздействия при низких концентрациях альфа-циперметрина и лямбда-цигалотрина на активность и состав множественных форм кислой фосфатазы (КФ) и морфофункциональной оценки тканей гепатопанкреаса моллюска живородки речной (*Viviparus viviparus* L.).

Объекты и методы исследования

У моллюсков гепатопанкреас обычно является основным органом-мишенью для оценки эффектов многих ксенобиотиков. Этот ор-

ган не только отвечает за пищеварение, но и за детоксикацию и выведение токсинов, поэтому он является подходящим для оценки биомаркером [13]. В качестве материала для исследования были использованы гомогенаты тканей пищеварительной железы (гепатопанкреаса) живородки речной, в которой определяли активность кислой фосфатазы (КФ), являющейся ферментом обменного комплекса и индикатором общего состояния гомеостаза. В отличие от работы [14], в настоящем исследовании применены низкие концентрации альфа-циперметрина (торговое название ШАРПЕЙ МЭ) и лямбда-цигалотрина (торговое название ЦИГАТРИН КЭ), соответствующие 10 ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения ($\text{ПДК}_{\text{рыб-хоз.}} = 0,0000054 \text{ мг/дм}^3$ для альфа-циперметрина и $\text{ПДК}_{\text{рыб-хоз.}} = 0,0000007 \text{ мг/дм}^3$ для лямбда-цигалотрина) согласно приказу Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 г. № 552 (с изменениями на 10 марта 2020 г.), что в большей степени соответствует реальным концентрациям в водных объектах средней полосы Евразии. Оба токсиканта входят в «топ-двадцать рейтинга агрегированного риска пестицидов для гидробионтов» [12].

Реакцию комплекса КФ живородки речной в ответ на токсическое действие инсектицидов оценивали по результатам острого опыта (от 0 до 96 ч). Эксперименты проводились аналогично известным исследованиям, проведённым с целью биотестирования качества вод и оценки токсичности загрязнителей для гидробионтов [18]. Опытные особи содержались в аквариумах объёмом 30 л, накрытых стеклом; концентрация токсикантов: альфа-циперметрин – $0,000054 \text{ мг/дм}^3$, лямбда-цигалотрина – $0,0000007 \text{ мг/дм}^3$. Моллюски в период эксперимента в качестве питания получали гранулированный корм и не взаимодействовали с субстратом [19]. Экспозиция опыта составляла 0, 2, 4, 6, 12, 24, 48, 72, и 96 ч. Контрольные особи содержались в воде без добавления токсиканта при тех же условиях и временных интервалах. В ходе эксперимента наблюдалось снижение двигательной активности животных экспериментальных групп в сравнении с контрольной группой, но не наблюдалась гибель животных. По истечении времени воздействия отбирали по 6 животных и препарировали их для извлечения пищеварительной железы. Ткани гомогенизировали в фарфоровой ступке в течение 5 мин растиранием с битым кварцевым стеклом и экстрагирующей жидкостью. В качестве экстра-

гирующей жидкости использовали 0,5 %-ый раствор Тритон X-100 на дистиллированной воде, прибавляемый в десятикратном объёме по отношению к навеске ткани. Экстракты очищали центрифугированием при 10000 g и 4°C в течение 30 мин на рефрижераторной центрифуге [20]. Полученные супернатанты отбирали и использовали в дальнейших исследованиях. Концентрацию белка в экстрактах определяли методом Лоури [21]. Активность КФ определяли спектрофотометрически по скорости гидролиза модельного субстрата – *p*-нитрофенилфосфата. За единицу активности (Е) принимали количество фермента, дающего прирост содержания продукта ферментативной реакции на 1 мкмоль за 1 мин [22].

Обнаружение зон нахождения КФ проводили по методике Берстона, усовершенствованной Лойда с соавторами [23]. В качестве субстрата использовался 0,3 %-ный раствор α -нафтилфосфата, проявляющего пигмента – прочный синий Б (Fast Blue B, «Chemapol», Чехия).

Часть фрагментов ткани гепатопанкреаса фиксировали в 10 % нейтральном забуференном формалине с дальнейшим обезвоживанием и пропиткой через спирты возрастающей концентрации (50° , 60° , 70° , 80° и 96°) и ксилол 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 $\times 10$, $\times 15$, объективы $\times 4$, $\times 10$, $\times 20$, $\times 40$, $\times 100$.

Относительную электрофоретическую подвижность (ОЭП) рассчитывали для каждой выявленной зоны активности КФ как отношение пробега белка к пробегу лидирующего красителя бромфенолового синего.

Все исследования проводили в трёх аналитических повторностях. Статистическую обработку данных проводили при помощи Microsoft Excel. Результаты представлены в виде «среднее значение $\pm$ стандартное отклонение».

Результаты и обсуждение

При анализе изменений КФ под действием пиретроидов выявлена колебательная

динамика активности фермента. Активность фермента в гепатопанкреасе живородки речной не остаётся постоянной на протяжении эксперимента, как у контрольной, так и у опытной групп исследованных животных вследствие естественных метаболических процессов в организме и имеет фазовый характер, что является отражением процессов индукции и репрессии ферментов (рис. 1, 2).

Под действием альфа-циперметрина в первые 12 ч экспозиции отмечается резкое увеличение активности. Активность КФ в гепатопанкреасе живородки речной опытной группы возросла почти в 5 раз относительно контрольной группы. Наибольшее значение активности выявлено при 48 ч экспозиции. Далее активность фермента несколько уменьшается, но при этом превышает контрольные значения в 4–10 раз до конца эксперимента (96 ч). Действие лямбда-цигалотрина привело к аналогичному повышению активности КФ. Наибольшее значение активности фермента отмечается в первые часы экспозиции и превышает контрольные значения почти в 6 раз. К 12 ч экспозиции активность фермента несколько уменьшается, но превышает контрольные значения в 5 раз. В сравнении с данными, полученными нами ранее при действии повышенной концентрации циперметрина [14], когда во второй фазе эксперимента на-

блюдалось стабильное угнетение фермента, характер зависимостей, зафиксированных при действии 10 ПДК_{рыб.хоз.} указывает на активные адаптационные процессы без существенного контаминирующего воздействия.

Результаты сравнения зависимостей биохимического воздействия изучаемых пиретроидов свидетельствуют об отсутствии различий в степени влияния отдельных соединений. Увеличение активности относительно контроля сохраняется до конца эксперимента, при этом не наблюдается её подавление (рис. 1). Авторы [24, 25] отмечают низкую активность ферментов I фазы биотрансформации, участвующих в окислении ряда органических соединений у моллюсков по сравнению с позвоночными животными. В изучаемом случае, для пресноводного моллюска *V. viviparus*, кинетика накопления и метаболизма синтетических пиретроидов, по-видимому, не имеет принципиального значения, хотя существует смещение по времени фаз активности при действии лямбда-цигалотрина. Существующая оценка токсичности пестицидов [12] относит лямбда-цигалотрин к одному из наиболее биоаккумулирующихся токсикантов.

В ходе проведения энзим-электрофореза в контрольной группе выявлены 3 множественные формы кислой фосфатазы в гепатопанкреасе *V. viviparus* (КФ3, КФ4, КФ6)

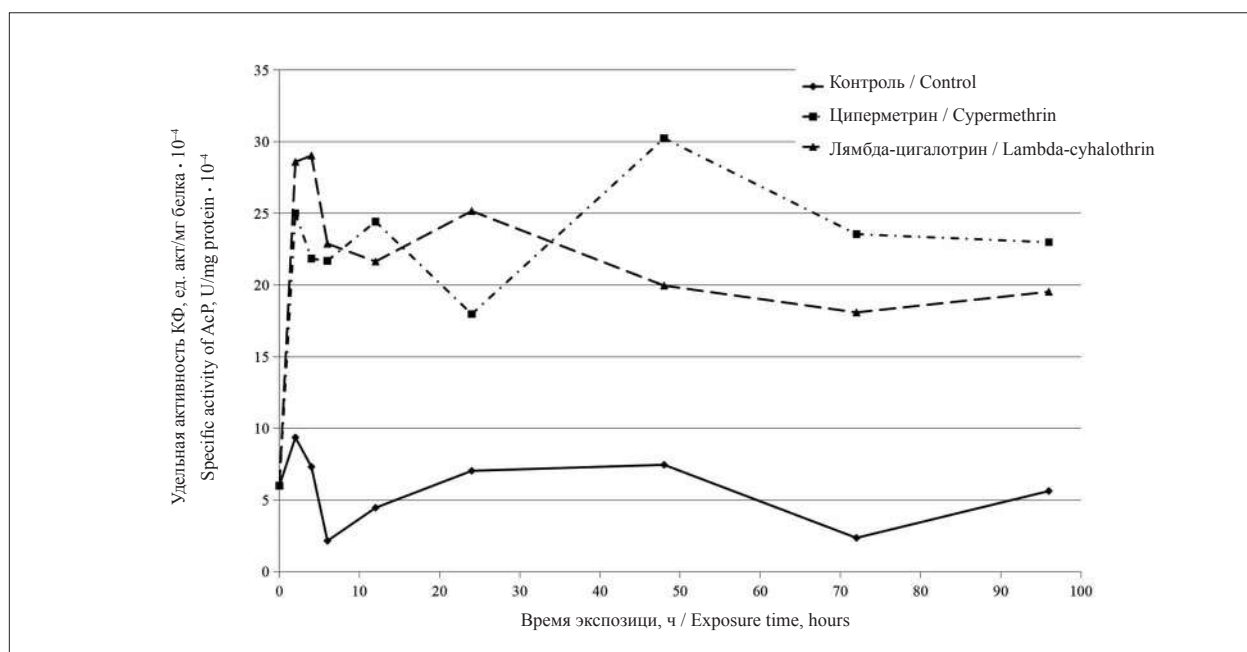


Рис. 1. Изменение удельной активности КФ живородки речной (*Viviparus viviparus* L.) под действием пиретроидов, $p = 0,05$

Fig. 1. Changes in specific activity of acid phosphatase (AcP) of *Viviparus viviparus* L. exposed to pyrethroids, $p = 0.05$

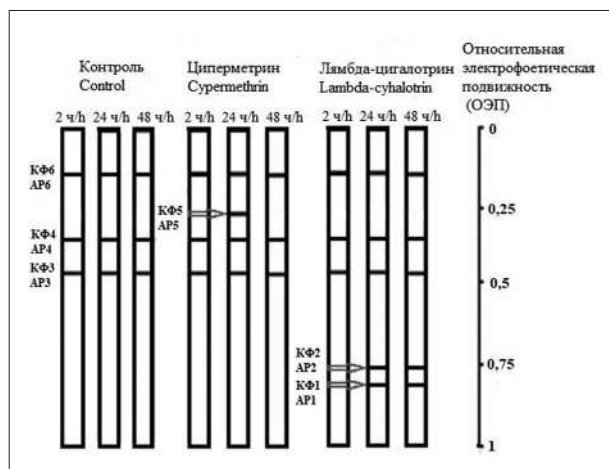


Рис. 2. Схемы энзим-электрофореграмм множественных форм КФ гепатопанкреаса *V. viviparus* в норме и при воздействии пиретроидов (ОЭП₁=0,83; ОЭП₂=0,76; ОЭП₃=0,45; ОЭП₄=0,36; ОЭП₅=0,27; ОЭП₆=0,15). 2, 24 и 96 ч – время экспозиции / **Fig. 2.** Schemes of enzyme electrophoregrams of multiple forms of acid phosphatase (AP) of *V. viviparus* hepatopancreas unexposed and exposed to pyrethroids (REM₁=0.83; REM₂=0.76; REM₃=0.45; REM₄=0.36; REM₅=0.27; REM₆=0.15). 2, 24 and 96 hours – exposure time

(рис. 2). В опытных группах под воздействием пиретроидов на фоне увеличения активности КФ отмечен синтез новых множественных форм фермента в гепатопанкреасе *V. viviparus*. Под воздействием циперметрина выявлена одна новая множественная форма кислой фосфатазы (КФ5) с относительной электрофоретической подвижностью (ОЭП) ОЭП₅ = 0,27. Под воздействием лямбда-цигалотрина выявлены две новые множественные формы кислой фосфатазы (КФ1 и КФ2) с ОЭП₁ = 0,83 и ОЭП₂ = 0,76. В ранее проведенной работе при действии циперметрина на кислую фосфатазу живородки речной в концентрации, соответствующей 10 ПДК для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения (ПДК/ОДУ = 0,006 мг/л) согласно СанПиН 1.2.3685-21 отмечено появление двух новых множественных форм фермента с низкой электрофоретической подвижностью [14].

Стоит отметить, что в аналогичном эксперименте под действием фосфорорганических пестицидов (малатиона и глифосата) также отмечается увеличение активности КФ живородки речной относительно контрольных значений, при этом под действием малатиона происходит более мощное увеличение активности (увеличение активности в 10 раз относительно контроля при 4 ч экспозиции). Анализ электрофореграмм форм КФ, полученных

при воздействии фосфорорганических соединений, показал, что при общем повышении активности фермента число множественных форм увеличивается [26]. Полученные данные соответствуют данным изучения биохимического воздействия пиретроидов на рыб. Опубликованы известные примеры биохимического изучения активности фосфатаз в ответ на воздействие пиретроидов, при этом, как правило, активность этих ферментов обменного комплекса увеличивается [27, 28].

Проводимые ранее исследования по изменению качественного состава белков при интоксикации фосфорорганическими пестицидами выявили образование стресс-белков (металлотионеинов), что связывают с увеличением активности КФ [17].

Авторы исследования [29] отмечают, что альфа-циперметрин и лямбда-цигалотрин способны вызывать значительное увеличение специфической активности различных биохимических систем у *Channa punctatus*: перекисного окисления липидов, удельной активности лактатдегидрогеназы, кислой и щелочной фосфатаз в остром эксперименте (96 ч).

Морфологические изменения в тканях гепатопанкреаса. Гепатопанкреас моллюсков представляет собой орган, состоящий из удлинённых и тесно связанных между собой канальцев. Они часто соединены между собой, но иногда встречаются островки соединительнотканых клеток и волокон среди них. По имеющимся данным, гепатопанкреас включает в себя два типа клеток [30, 31]: 1) пищеварительные клетки, которые имеют округлые ядра, расположенные близко к плазматической мембране, и вся их апикальная область заполнена базофильными гранулами одинакового размера; 2) экскреторные клетки, которые бледнее, чем пищеварительные клетки, и содержат одно или несколько включений неправильной формы.

У моллюсков обеих групп сохраняется структура органа. Строение среза гепатопанкреаса у моллюсков контрольной группы соответствует норме и представлено на микрофотографии (рис. 3, см. цв. вкладку III). На микрофотографиях срезов моллюсков из опытных групп (рис. 4, см. цв. вкладку III) при патоморфологическом анализе визуально определяется доля митотических клеток, клеток в состоянии апоптоза и некроза. Обобщённые данные о морфологических изменениях в тканях гепатопанкреаса под действием альфа-циперметрина и лямбда-цигалотрина приведены в таблице.

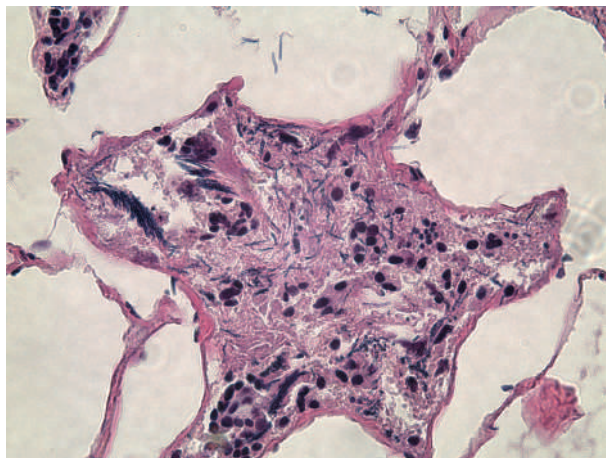


Рис. 3. Срез гепатопанкреаса *V. viviparus* (экспозиция 0 часов (контроль)),
окраска – гематоксилин и эозин, ×400
Fig. 3. Section of the hepatopancreas of *V. viviparus* (exposure 0 hours (control)),
staining – hematoxylin and eosin, ×400

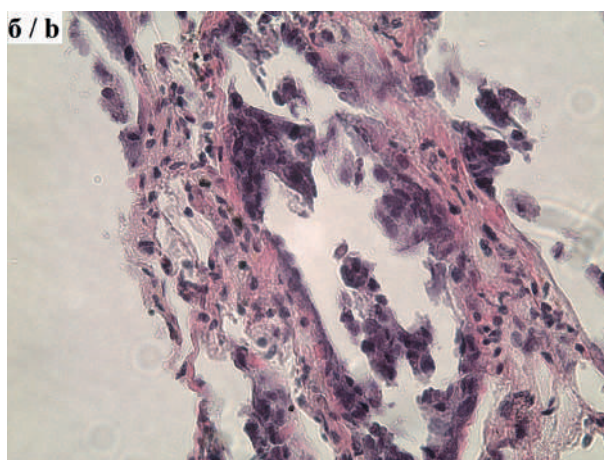
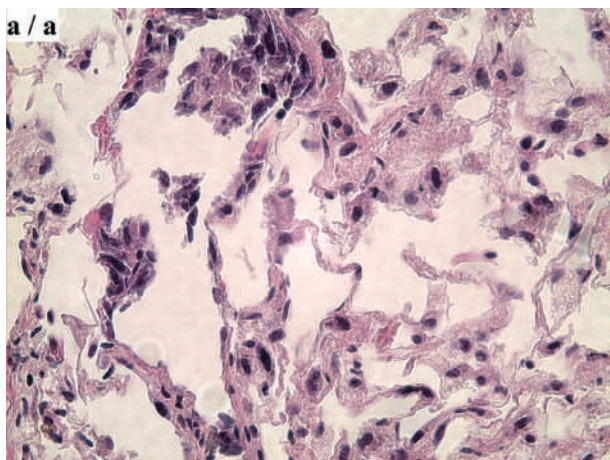


Рис. 4. Срез гепатопанкреаса *V. viviparus* при воздействии: а) лямбда-цигалотрина (экспозиция 24 ч (опыт)), б) циперметрина (экспозиция 96 ч (опыт)). Окраска – гематоксилин и эозин, ×400
Fig. 4. Section of the hepatopancreas of *V. viviparus* exposed to: a) lambda-cyhalothrin (exposure time 24 h (experiment)), b) cypermethrin (exposure time 96 h (experiment)). Staining – hematoxylin and eosin, ×400

Таблица / Table

Изменения в тканях гепатопанкреаса *V. viviparus* при воздействии альфа-циперметрина и лямбда-цигалотрина / Changes in *V. viviparus* hepatopancreas tissues exposed to alpha-cypermethrin and lambda-cyhalothrin

Время экспозиции, ч Exposure time, h	Патологические изменения Pathological changes	Некроз, апоптоз, % Necrosis, apoptosis, %	Митозы, % Mitosis, %
При воздействии альфа-циперметрина / When exposed to alpha-cypermethrin			
0	не обнаружено / not detected	не обнаружено / not detected	$0,83 \pm 0,09$
4	не обнаружено / not detected	не обнаружено / not detected	$0,91 \pm 0,08$
24	не обнаружено / not detected	не обнаружено / not detected	$0,71 \pm 0,10$
96	клетки в состоянии кариопикноза, кариорексиса, кариолизиса, единичные некротизированные клетки cells with karyopycnosis, karyorexis, karyolysis, and single necrotic cells	$24,8 \pm 3,4$ патологически изменённых клеток, апоптических не наблюдалось $24,8 \pm 3,4$ of pathologically altered cells, apoptotic cells were not detected	$2,11 \pm 0,34$
При воздействии лямбда-цигалотрина / When exposed to lambda-cyhalothrin			
0	не обнаружено / not detected	не обнаружено / not detected	$0,81 \pm 0,09$
4	не обнаружено / not detected	не обнаружено / not detected	$0,74 \pm 0,07$
24	клетки в состоянии кариопикноза, кариорексиса, кариолизиса, единичные некротизированные клетки cells with karyopycnosis, karyorexis, karyolysis, and single necrotic cells	$4,2 \pm 0,2$ клеток с патологическими изменениями, единичные апоптические клетки / $4,2 \pm 0,2$ of pathologically altered cells, apoptotic cells were not detected	$2,41 \pm 0,11$
96	клетки в состоянии кариопикноза, кариорексиса, кариолизиса, единичные некротизированные клетки cells with karyopycnosis, karyorexis, karyolysis, and single necrotic cells	$18,8 \pm 2,4$ патологически изменённых клеток, апоптических не наблюдалось $18,8 \pm 2,4$ of pathologically altered cells, apoptotic cells were not detected	$3,60 \pm 0,24$

В опытной группе при воздействии лямбда-цигалотрина (рис. 4а, табл.) через 24 ч экспозиции появляются клетки в состоянии кариопикноза, кариорексиса, кариолизиса и единичные некротизированные клетки, а в опытной группе при воздействии циперметрина (рис. 4б, табл.) аналогичные изменения наступают через 96 ч экспозиции.

Заключение

В результате проведённого исследования выявлено, что альфа-циперметрин и лямбда-цигалотрин при остром воздействии в дозах $10 \text{ ПДК}_{\text{рыб.хоз.}}$ вызывают существенное увеличение активности КФ и появление новых множественных форм КФ гепатопанкреаса моллюска *Viviparus viviparus* L. Это указывает на сильное стресс-индуцирующее действие исследуемых пиретроидов, что подтверждается при оценке морфологического состояния тканей гепато-

панкреаса живородки речной: появляются клетки в состоянии кариопикноза, кариорексиса, кариолизиса и единичные некротизированные клетки. Угнетение ферментной системы, которое фиксировалось ранее при действии повышенной концентрации альфа-циперметрина не наблюдалось. Обнаружение нескольких новых изоформ КФ в белковых экстрактах, полученных из тканей гепатопанкреаса, указывает на протекание адаптационных биохимических процессов в клетках пищеварительной железы моллюска в ответ на воздействие альфа-циперметрина и лямбда-цигалотрина. Появление нескольких форм фермента КФ в печени может представлять интерес для дифференциальной диагностики органических и функциональных поражений органов и тканей. Таким образом, проведённое исследование биохимических показателей моллюсков при воздействии пиретроидов подтверждает возможность использования

изменения активности и множественных форм кислой фосфатазы гепатопанкреаса живородки речной как индикатора токсического воздействия в эколого-биохимическом мониторинге загрязнений пресных вод.

References

1. Gorbenko A.D., Morozova Ya.A., Sevostyanova E.P., Andreevskaya V.M., Kolesnikova O.A., Sevostyanov M.A. Synthetic pyrethroids and natural pyrethrins – review // *Vestnik agrarnoy nauki*. 2024. No. 5 (110). P. 3–15 (in Russian). doi: 10.17238/issn2587-666X.2024.5.3
2. Soderlund D.M. Molecular mechanisms of pyrethroid insecticide neurotoxicity: recent advances // *Arch. Toxicol.* 2012. V. 86. No. 2. P. 165–181. doi: 10.1007/s00204-011-0726-x
3. Eni G., Ibor O.R., Andem A.B., Oku E.E., Chukwuka A.V., Adeogun A.O., Arukwe A. Biochemical and endocrine-disrupting effects in *Clarias gariepinus* exposed to the synthetic pyrethroids, cypermethrin and deltamethrin // *Comp. Biochem. Physiol. C: Toxicol. Pharmacol.* 2019. V. 225. Article No. 108584. doi: 10.1016/j.cbpc.2019.108584
4. Hill I.R. Effects on non-target organisms in terrestrial and aquatic environments // *The pyrethroid insecticides* / Ed. J.P. Leahey. Philadelphia: Taylor & Francis, 1985. P. 151–262. doi: 10.1021/bk-2008-0991.ch014
5. Zimmer E.I., Preuss T.G., Norman S., Minten B., Ducrot V. Modelling effects of time-variable exposure to the pyrethroid beta-cyfluthrin on rainbow trout early life stages // *Environ. Sci. Eur.* 2018. V. 30. No. 1. Article No. 36. doi: 10.1186/s12302-018-0162-0
6. Ait Ayad M., Ait Fdil M., Mouabad A. Effects of cypermethrin (pyrethroid insecticide) on the valve activity behavior, byssal thread formation, and survival in air of the marine mussel *Mytilus galloprovincialis* // *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 2011. V. 60. No. 3. P. 462–470. doi: 10.1007/s00244-010-9549-7
7. Bradbury S.P., Coats J.R. Comparative toxicology of the pyrethroid insecticides // *Reviews of environmental contamination and toxicology* / Ed. G.W. Ware. New York: Springer-Verlag, 1989. P. 133–177. doi: 10.1007/978-1-4613-8850-0_4
8. Köprücü K., Yonar S.M., Şeker E. Effects of cypermethrin on antioxidant status, oxidative stress biomarkers, behavior, and mortality in the freshwater mussel *Unio elongatulus eucirrus* // *Fish. Sci.* 2010. V. 76. No. 6. P. 1007–1013. doi: 10.1007/s12562-010-0293-8
9. Ray M., Bhunia A.S., Bhunia N.S., Ray S. Density shift, morphological damage, lysosomal fragility and apoptosis of hemocytes of Indian molluscs exposed to pyrethroid pesticides // *Fish Shellfish Immunol.* 2013. V. 35. No. 2. P. 499–512. doi: 10.1016/j.fsi.2013.05.008
10. Mandal A.H., Sadhu A., Ghosh S., Saha N.C., Mossotto C., Pastorino P., Saha S., Faggio C. Evaluating the impact of neonicotinoids on aquatic non-target species: A comprehensive review // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2025. V. 113. Article No. 104606. doi: 10.1016/j.etap.2024.104606
11. Werner I., Moran K. Effects of pyrethroid insecticides on aquatic organisms // *Synthetic pyrethroids: occurrence and behavior in aquatic environments: ACS symposium series*. 2008. V. 991. P. 310–335. doi: 10.1021/bk-2008-0991.ch014
12. Gorbatov V.S., Astaikina A.A., Aptikaev R.S., Tikhonov V.V. Comparative hazard and risk assessment of pesticides for aquatic organisms // *Agrokhimiya*. 2019. No. 11. P. 17–26 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119110061
13. Fernández San Juan M.R., Cortelezzi A., Albornoz C.B., Landro S.M., Arrighetti F., Najle R., Lavarias S.M.L. Toxicity of pyrethroid cypermethrin on the freshwater snail *Chilina parchappii*: lethal and sublethal effects // *Ecotoxicol. Environ. Safety*. 2020. V. 196. Article No. 110565. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110565
14. Tishina E.A., Polikarpova L.V., Droganova T.S., Lazareva A.A., Vasiliev N.V. Multiple forms of enzyme systems of gastropod molluscs under the action of pyrethroids // *Anthropogenic impact on aquatic organisms and ecosystems: sbornik materialov VIII vserossiyskoy konferentsii po vodnoy ekotoksikologii, posvyashchennoy 85-letiyu so dnya rozhdeniya B.A. Flerova*. Yaroslavl: Filigran, 2023. P. 109–111 (in Russian).
15. 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 Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 109–113 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-109-113
16. Konin D.N., Konichev A.S. Heavy metal ions effect on proteolytic activity in the liver of *Viviparus viviparus* L. molluscs // *Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences*. 2007. No 1. P. 3–6 (in Russian).
17. Tishina E.A., Droganova T.S., Polikarpova L.V. Effect of organophosphorus compounds on changes in the qualitative composition of proteins of freshwater mollusks // *Ecosystem transformation affected by natural and anthropogenic factors: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii*. Kirov: Vyatka State University, 2019. P. 162–165 (in Russian).
18. Kovačić I., Fafandel M., Perić L., Batel I. Effect of environmental pollutant mixtures on acid DNase activity in mussel *Mytilus galloprovincialis*: *ex situ* and *in situ* study // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. V. 99. No. 4. P. 433–437. doi: 10.1007/s00128-017-2162-y
19. Nusetti O., Marcano L., Zapata E., Esclapés M., Nusetti S., Lodeiros C. Immunological and antioxidant enzyme responses in the pearl oyster *Pinctada imbricata* (Mollusca: Pteridae) exposed to sublethal levels of fuel oil // *Interciencia*. 2004. No 6. V. 29. P. 324–328 (in Spanish).
20. Droganova T.S., Konichev A.S., Petrenko D.B., Polikarpova L.V., Tsvetkov I.L. 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. // Bulletin of Moscow State Regional University. Series: Natural Sciences. 2017. No. 4. P. 36–45 (in Russian).

21. Lowry O.H., Rosenbrought N.J., Farr A.L., Randall R.L. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent // J. Biol. Chem. 1951. V. 193. No. 2. P. 265–275. doi: 10.1016/S0021-9258(19)52451-6

22. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of *p*-nitrophenyl phosphate 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

23. Loida Z., Gossrau R., Schibler T. Enzyme histochemistry: laboratory methods. Moskva: Mir, 1982. 272 p. (in Russian).

24. Livingstone D.R. Biotechnology and pollution monitoring: use of molecular biomarkers in the aquatic environment // J. Chem. Tech. Biotechnol. 1993. V. 57. P. 195–211. doi: 10.1002/jctb.280570302

25. Narbonne J.F., Garrigues P., Ribera D., Raoux C., Mathieu A., Lemaire P., Salaun J.P., Lafaurie M. Mixed-function oxygenase enzymes as tools for pollution monitoring: field studies on the French coast of the Mediterranean Sea // Comp. Biochem. Physiol. C Comp. Pharmacol. Toxicol. 1991. V. 100. No. 1–2. P. 37–42. doi: 10.1016/0742-8413(91)90118-d

26. Tishina E.A., Droганova T.S., Polikarpova L.V., Vasiliev N.B. Effect of phosphorus-containing pesticides

on the enzymatic activity and multiple forms of acid phosphatase of river snail (*Viviparus viviparus* L.) // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 2. P. 151–158 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-151-158

27. Das B.K., Mukherjee S.C. Toxicity of cypermethrin in *Labeo rohita* fingerlings: biochemical enzymatic and haematological consequences // Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol. 2003. V. 134. No. 1. P. 109–121. doi: 10.1016/s1532-0456(02)00219-3

28. Johal M.S., Sandhu G.S., Kaur R. Effect of fenvalerate on acid and alkaline phosphatase activity in certain tissues of *Heteropneustes fossilis* (Bloch) // Pollut. Res. 2002. V. 21. No. 3. P. 309–313.

29. Kumar A., Sharma B., Pandey R.S. Assessment of stress in effect to pyrethroid insecticides, λ -cyhalothrin and cypermethrin, in a freshwater fish, *Channa punctatus* (BLOCH) // Cell. Mol. Biol. (Noisy-le-grand). 2012. V. 58. No. 1. P. 153–159.

30. Rebecchi B., Franchini A., Bolognani Fantin A.M. The digestive gland of *Viviparus ater* (Mollusca, Gastropoda, Prosobranchia): an ultrastructural and histochemical study // Tissue Cell. 1996. V. 28. No. 6. P. 731–739. doi: 10.1016/s0040-8166(96)80076-0

31. Griffond B., Gomot L. Cultivation *in vitro* of organs of the fresh water gastropod prosobranch mollusk *Viviparus viviparus* L. // In Vitro. 1974. V. 10. P. 206–215. doi: 10.1007/BF02615234

Биоиндикация ртутного загрязнения Бурейского водохранилища после зимнего оползня

© 2026. Л. М. Кондратьева, д. б. н., профессор,

Д. В. Андреева, к. б. н., с. н. с.,

З. Н. Литвиненко, к. б. н., с. н. с.,

Хабаровский Федеральный исследовательский центр,

Институт водных и экологических проблем

Дальневосточного отделения Российской академии наук,

680000, Россия, г. Хабаровск, ул. Дикопольцева, д. 56,

e-mail: zoyana2003@mail.ru

В декабре 2018 г. при температуре -32°C на Бурейском водохранилище сошёл гигантский оползень объёмом 24,5 млн м^3 . Оползень спровоцировал цунами и уничтожение леса, перекрыл доступ воды к Бурейской ГЭС. В результате взрывных работ был создан искусственный канал. Оползень выступил в роли биогеохимического барьера и важным фактором, влияющим на процессы формирования качества воды за счёт взаимодействия воды с размельчёнными горными породами, поступления большого объёма растительных остатков и органических веществ из разрушенного почвенного покрова. Масштабы последствий для экосистемы Бурейского водохранилища трудно оценить без использования современного интеграционного подхода, основанного на сочетании биологических и физико-химических методов. В летний период 2022 г. на водохранилище проведены экологические исследования *in situ* и *in vitro* с использованием микробиологических и спектральных методов. В качестве объектов биоиндикации состояния водохранилища в зоне влияния оползня выступали микробные комплексы и отдельные штаммы культивируемых гетеротрофных бактерий, выделенных из разных местообитаний (поверхностные/ придонные слои воды; заливы, заполненные древесиной). В зоне влияния оползня из проб воды выделено 62 штамма бактерий. Около 50 % штаммов оказались ртуть-резистентными и росли в присутствии $100 \text{ мг/л Hg}(\text{NO}_3)_2$. Максимальную устойчивость к ртутному загрязнению проявляли штаммы сульфатредуцирующих бактерий, которые встречались в заливах с плавающей древесиной. Для оценки активности микробной трансформации модельного соединения гумата натрия в присутствии ртути использовали спектрофотометрический метод (Shimadzu UV-3600). Штаммы бактерий, выделенные из придонной воды с глубины 65 м, трансформировали ароматическую составляющую гумата натрия до группы компонентов-предшественников токсичных летучих веществ, способствующих образованию метилртути. В качестве биоиндикаторов пролонгированного экологического риска ртутного загрязнения Бурейского водохранилища в зоне влияния оползня рекомендованы сульфатредуцирующие бактерии с повышенной ртуть-резистентностью.

Ключевые слова: оползень, водохранилище, микробные комплексы, гуминовые вещества, метилртуть.

Bioindication of mercury pollution in the Bureya Reservoir after the winter landslide

© 2026. L. M. Kondratyeva ORCID: 0000-0002-7737-4786[†]

D. V. Andreeva ORCID: 0000-0003-1548-5066[†]

Z. N. Litvinenko ORCID: 0000-0002-1421-2827[†]

Khabarovsk Federal Research Center,

Institute of the Water and Ecology problems

Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,

56, Dikopoltsev St., Khabarovsk, Russia, 680000,

e-mail: zoyana2003@mail.ru

In December 2018, at a temperature of -32°C , a giant landslide with a volume of 24.5 million m^3 occurred on the Bureya Reservoir (BR). The landslide triggered tsunami and forest destruction, blocking water access to the Bureya Hydroelectric Power Station. An artificial channel was created as a result of blasting operations. The landslide acted as a biogeochemical barrier and a significant factor affecting water quality due to the water interaction with crushed rock and the influx of large volumes of plant debris and organic matter from the destroyed soil cover. The scale of the impact

on the BR ecosystem is difficult to assess without a modern integrated approach based on a combination of biological and physicochemical methods. In the summer of 2022, ecological studies *in situ* and *in vitro* using microbiological and spectral methods were conducted on the BR. Microbial complexes and individual strains of cultured heterotrophic bacteria isolated from different habitats (surface and bottom water layers; bays filled with wood) served as bioindication objects of the BR state at the research sites. 62 bacterial strains were isolated from water samples in the landslide-affected zone. About 50 % of the strains were Hg-resistant and grew in the presence of 100 mg/L $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$. The strains of sulfate-reducing bacteria that were found in bays with floating wood showed maximum resistance to mercury pollution. We use spectrophotometric method (Shimadzu UV-3600) to assess the activity of microbial transformation of the model sodium humate in the presence of mercury. Bacterial strains isolated from bottom water from a depth of 65 m transform the aromatic component of sodium humate into precursors of toxic volatile compounds that contribute methylmercury formation. Sulfate-reducing bacteria with increased Hg-resistance recommended as bioindicators of the long-term environmental risk of mercury pollution in the BR landslide zone.

Keywords: landslide, reservoir, microbial complexes, humic substances, methylmercury.

Современный подход в исследовании состояния водохранилищ принимает во внимание важнейшие стрессоры, к которым относятся изменение климата и разрушение среды обитания гидробионтов. Этот подход позволяет выявить коренные причины трансформации и прогнозировать вероятность деградации экосистем водоёмов [1]. К основным факторам, влияющим на стабильность водохранилищ, относятся гидроморфологические изменения, колебания уровня воды, эвтрофикация, органическое загрязнение и изменения в землепользовании в регионе [2, 3]. Нарушение экологического баланса в водохранилищах часто сопровождается утратой их способности к самоочищению [4]. Одним из методов оценки экологического состояния водоёмов, получивших всеобщее признание, является биоиндикация [5]. Оценка качества воды на основе биологических реакций организмов оказалась успешной для выявления экологических рисков в естественных водоёмах и водохранилищах [6]. В качестве модельных организмов для испытаний ответных реакций гидробионтов на воздействие природных и антропогенных факторов широко используются организмы различного уровня организации от продуцентов до деструкторов.

В последнее время многие масштабные процессы на нашей планете связывают с изменением биогеохимической активности на микроскопическом уровне [7]. Особое место в структуре биоты водохранилищ занимают микроорганизмы, которые способны разлагать органические вещества (ОВ) различного генезиса и структуры, обеспечивая их самоочищающий потенциал. Активизация микробиологических процессов в присутствии поллютантов приводит к изменению качества воды [8]. Перестройки в структуре микробных комплексов (МК) водохранилищ, участвующих в деструкции и трансформации ОВ, сопровождаются изменением уровня их

эвтрофикации, фракционного состава веществ в осадках, придонных и поверхностных слоях воды.

Среди токсичных элементов, распространённых во всех компонентах биосферы, включая водные объекты, важное место занимает ртуть, которая выступает фактором риска для организмов различного трофического уровня, включая человека [9]. Использование этого вещества в производстве привело к резкому увеличению экологических проблем, связанных с ртутным загрязнением атмосферы и почв, техногенно-преобразованных территорий [10]. Для контроля и сокращения антропогенных выбросов соединений ртути и снижения рисков для здоровья человека в октябре 2013 г. подписана Минаматская конвенция [11]. Ртуть циркулирует в окружающей среде чаще всего в форме ртутьорганических соединений, которые образуются из неорганических форм (HgO , HgS , HgCl_2) при участии микроорганизмов и, реже, посредством абиотических процессов [12].

Существует мнение, что недавно созданные водохранилища являются очагами образования метилртути, которая более биодоступна и токсична для гидробионтов, чем другие соединения. Уровень накопления соединений ртути в рыбе связывают с процессами биоаккумуляции и биотрансформации, включая её метилирование и деметилирование [13]. Основными участниками метилирования ртути в различных местообитаниях являются сульфатредуцирующие, железоредуцирующие бактерии и метаногены [14]. Особое место среди источников метильных групп занимают гуминовые вещества (ГВ). Они играют важную роль в формировании химического состава природных вод, способны связывать и инактивировать токсичные элементы [15]. Исследования взаимодействия ртути с ГВ проводили, в основном, в наземных экосистемах в связи с её аккумуляцией в почвах и растениях

[16]. Механизмы взаимодействия ГВ с различными элементами рассматривают чаще всего с геохимических позиций без учёта биогенного фактора, включая микроорганизмов, устойчивых к ртутному загрязнению. Большое внимание в миграции ртути уделяется микробным комплексам (МК) и отдельным штаммам микроорганизмов из разных местообитаний [14]. Однако доступности источников углерода для микроорганизмов и их способности разлагать стойкие ОВ в условиях ртутного загрязнения уделяется недостаточно внимания.

Цель наших исследований состояла в оценке влияния разных концентраций ртути на трансформацию гумата натрия отдельными штаммами бактерий, выделенных из разных местообитаний в Бурейском водохранилище после крупного зимнего оползня.

Объекты и методы исследования

Впервые на Бурейском водохранилище в зимний период (декабрь 2018 г.) при температуре -32°C произошёл оползень объёмом 24,5 млн м^3 , фактически создав природную дамбу (рис. 1). Глубина водохранилища на месте схода оползня составляет более 70 м. Объём надводной части оползня превышает 4,5 млн м^3 , основная его часть находится под водой. Оползень вызвал волну цунами, которая уничтожила значительную часть леса и привела к полному разрушению почвенного покрова до скальных пород. Весь органо-терригенный материал был смыт в водохранилище.

Площадь разрушенного почвенного покрова составила около 120 га, с неё было смыто около 6000 т неразложившихся ОВ органо-дерновых и торфянисто-органогенных почв [17]. Для восстановления проточности воды на месте схода оползня были проведены взрывные работы и создан искусственный канал. Описания геологических, геоморфологических, экологических и геофизических особенностей Бурейского оползня и причин его схода представлены в серии публикаций [18–20].

В летний период 2022 г. пробы воды были отобраны с использованием классического батометра из двух заливов (Первый и Средний Сандар), в которых скопилась раздробленная древесина, а также из поверхностных и придонных слоёв выше и ниже тела оползня (рис. 1). Для оценки качественного состава ОВ в воде Бурейского водохранилища в районе оползня использовали спектрофотометри-

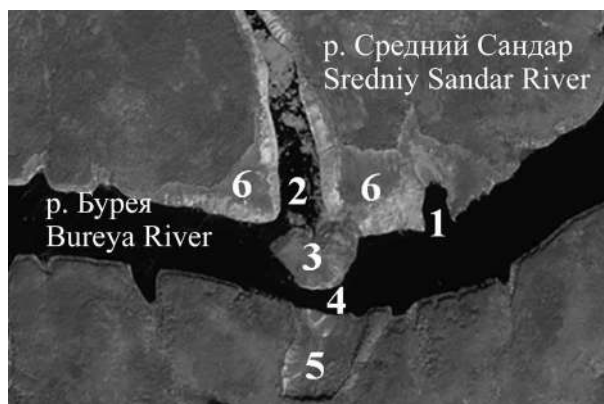


Рис. 1. Место расположения оползня по данным космического зондирования от 13.05.2019 (ИСЗ Sentinel 2A/MSI): 1 – залив Первый; 2 – залив Средний Сандар; 3 – тело оползня; 4 – канал; 5 – место схода оползня; 6 – территория уничтоженного леса

Fig. 1. Landslide location according to satellite imaging data from May 13, 2019 (Sentinel 2A/MSI): 1 – Pervyy Bay; 2 – Sredniy Sandar Bay; 3 – landslide body; 4 – channel; 5 – landslide site; 6 – the destroyed forest area

ческий метод (Shimadzu UV-3600, Япония). Суммарное содержание растворённых ОВ (ОВ_{254}) определяли при длине волны $\lambda = 254 \text{ нм}$, а ароматических соединений (ОВ_{275}) – при $\lambda = 275 \text{ нм}$ [21]. Долю ОВ, влияющих на окраску воды за счёт водорастворимых фракций гуминовых веществ и их хромофорных групп, определяли при длине волны $\lambda = 365 \text{ нм}$ [22].

Численность культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ) определяли на рыбо-пептонном агаре, разбавленном в 10 раз (РПА:10), сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) – на среде Постгейта и выражали в колонии образующих единицах (КОЕ/мл). Исследования проводили в трёх повторностях. При анализе структуры микробных комплексов статистическую обработку данных проводили с использованием программы Microsoft Excel, 2013.

Для определения ртуть-резистентности выделенных штаммов бактерий использовали нитрат ртути(II) $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ в концентрации 1, 10 и 100 мг/л , который добавляли в расплавленную стерильную агаризованную среду перед разливом в чашки Петри. Идентификацию до рода ртуть-резистентных штаммов бактерий проводили на основании физиологических, культурально-морфологических признаков и окраски по Граму [23]. Активность штаммов по отношению к трудно минерализуемому источнику углерода гумату натрия (ГNa) определяли по результатам их культивирования при температуре 23°C в присутствии 10 и

100 мг/л $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$, на жидкой среде М9 следующего состава (г/л дистиллированной воды): KH_2PO_4 – 1,33; K_2HPO_4 – 2,67; NH_4Cl – 1; Na_2SO_4 – 2; KNO_3 – 2; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,001; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,1; GNa – 0,2.

Особенности микробной трансформации GNa в присутствии разных концентраций $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ определяли спектрофотометрическим методом (Shimadzu UV-3600, Япония) по изменению значений абсорбции культуральной жидкости на 30 сут, после её фильтрации через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм при разных длинах волн [21, 22], аналогично природным водам. В качестве контроля использовали питательную среду с GNa без инокулята.

Результаты и обсуждение

Зимний оползень на Бурейском водохранилище сопровождался рядом неординарных событий: разрушение береговой линии, речное цунами, снос почвенного покрова и масштабное уничтожение леса, особенно на правом пологом берегу. Последствия этих событий были зарегистрированы по микробиологическим показателям до начала взрывных работ и после них в искусственном канале, выше и ниже тела оползня [24]. В зимний период 2019 г. численность КГБ в воде вокруг оползня составляла от 63 ± 2 до 144 ± 10 КОЕ/мл. После взрывных работ общая численность КГБ

в канале увеличилась до 484 ± 12 КОЕ/мл, но в марте их численность стабилизировалась на уровне 133 ± 13 КОЕ/мл.

Поступление в донные отложения трудно разлагаемых ОВ, лимитирование содержания кислорода, формирование анаэробных условий в контактной зоне «вода–дно» способствовали активизации микробиологических процессов в летний период 2022 г. Согласно спектрофотометрическим исследованиям воды в Бурейском водохранилище, максимальное содержание растворённых O_{254} , ароматических соединений O_{275} и хромовых компонентов O_{365} зарегистрировано в придонной воде выше тела оползня на глубине 65 м (табл. 1), где происходит активная седиментация взвешенного материала.

Проведённые исследования показали значительный вклад СРБ в структуру МК водохранилища в зоне влияния оползня, особенно в заливах с большим количеством плавающей и затопленной древесины, которая при разложении выступает в качестве источника углерода (целлюлоза, гуминовые вещества) и метильных групп для метилирования ртути. При оценке экологического риска ртутного загрязнения водохранилища «Три ущелья» (КНР) установлено, что при факультативно-анаэробных условиях рост СРБ сопровождался активным метилированием ртути [25]. Доказано, что бактериобентос участвует в трансформации ОВ разного строения, суль-

Таблица 1 / Table 1

Характеристика состава воды в зоне влияния оползня / Water composition in the landslide impact zone

Места отбора проб воды Sample plots	Температура, °C Temperature, °C	Спектральная характеристика воды, ед. абсорбции / Spectral characteristics of the water, absorption units			Численность, КОЕ/мл Abundance, CFU/mL	
		254 нм / nm	275 нм / nm	365 нм / nm	КГБ CHB	СРБ SRB
Залив Первый / Pervyy Bay	19,7	0,260	0,207	0,049	141 ± 2	140 ± 4
Приток в залив Ср. Сандар Tributary to the Sredniy Sandar Bay	8,2	0,285	0,229	0,055	57 ± 14	24 ± 2
Залив Ср. Сандар Sredniy Sandar Bay	18,5	0,163	0,130	0,030	151 ± 12	282 ± 4
Выше канала, поверхностная Above the channel, surface	16,5	0,274	0,219	0,051	63 ± 14	34 ± 2
Ниже канала, поверхностная Below the channel, surface	17,1	0,343	0,277	0,071	100 ± 11	74 ± 5
Выше канала, придонная (65 м) Above the channel, bottom (65 m)	11,2	0,415	0,337	0,090	75 ± 4	80 ± 3
Ниже канала, придонная (33 м) Below the channel, bottom (33 m)	14,8	0,297	0,239	0,063	85 ± 3	66 ± 3

Примечание: КГБ – культивируемые гетеротрофные бактерии, СРБ – сульфатредуцирующие бактерии.
Note: CHB – cultivated heterotrophic bacteria, SRB – sulfate-reducing bacteria.

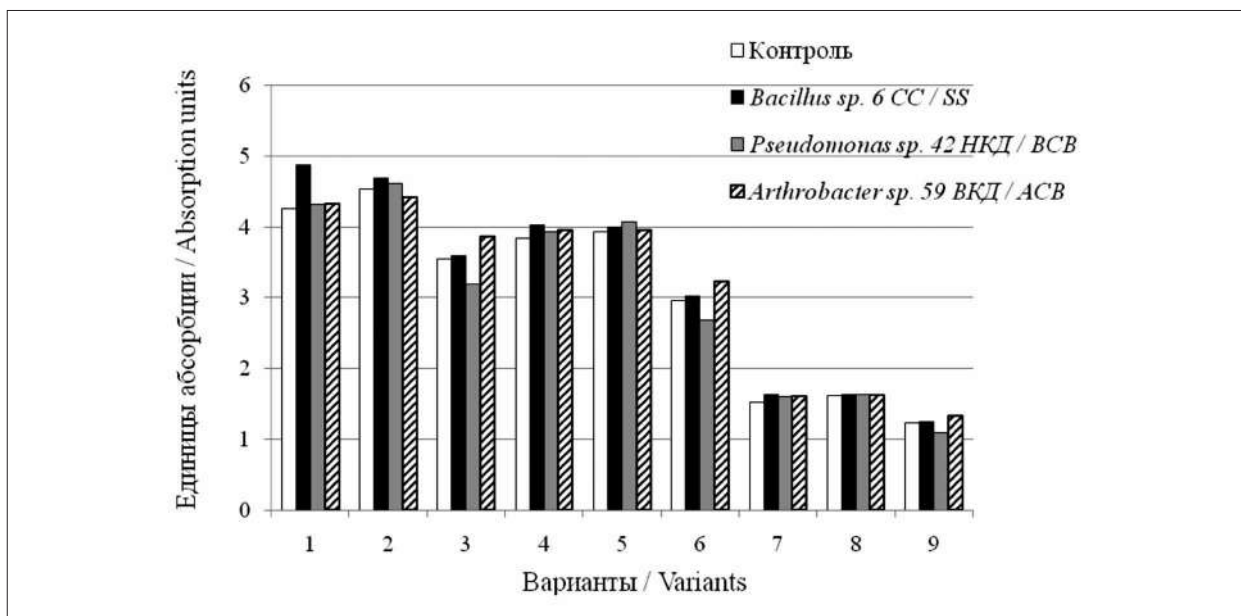


Рис. 2. Влияние разных концентраций ртути на изменение спектральных характеристик гумата натрия (ГNa) при его микробной трансформации: 1, 2, 3 – алифатические компоненты (254 нм); 4, 5, 6 – ароматические компоненты (275 нм); 7, 8, 9 – хромофорные группы (365 нм); 1, 4, 7 – ГNa без ртути; 2, 5, 8 – ГNa + 10 мг/л $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$; 3, 6, 9 – ГNa + 100 мг/л $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$

Fig. 2. The effect of different mercury concentrations on sodium humate (SH) spectral characteristics during its microbial transformation: 1, 2, 3 – aliphatic components (254 nm); 4, 5, 6 – aromatic components (275 nm); 7, 8, 9 – chromophoric groups (365 nm); 1, 4, 7 – SH mercury-free; 2, 5, 8 – SH with 10 mg/L $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$; 3, 6, 9 – SH with 100 mg/L $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$

фатредукции и миграции элементов, включая переход неорганических соединений ртути в метилртуть [26].

Оползень и поступившие с поверхностным стоком ОВ растительного происхождения становятся причиной эвтрофирования и повышения гумификации водохранилища. Установлено, что ГВ, выступая в роли источника углерода для бактерий, предоставляют органические лиганды, связывающие ионы ртути. В результате микробиологических процессов происходит метилирование ртути и изменяется её биодоступность [27]. В условиях эвтрофирования водохранилищ возникают предпосылки для активизации биогеохимического цикла ртути [28], поэтому повышается степень экологического риска образования токсичной метилртути.

Из проб воды с разных участков Бурейского водохранилища вокруг оползня выделено 62 штамма бактерий, которые активно росли на питательных средах в присутствии 10 мг/л соли ртути. Около 50 % из них оказались устойчивыми к 100 мг/л этой соли. Большинство из этих штаммов активно росли на агаризованных питательных средах разного состава в присутствии нитрата ртути. Для оценки влияния ртути на особенности микробного метаболизма, трудно минерализуемого ГNa были

отобраны три ртуть-резистентных штамма бактерий, из разных местообитаний: *Bacillus sp. 6CC* – изолирован из пробы воды, отобранной в заливе Средний Сандар; *Pseudomonas sp. 42 НКД* выделен из придонной воды ниже канала; *Arthrobacter sp. 59 ВКД* – из придонной воды выше канала. Они использовали ГNa в качестве источника углерода при росте на агаризованной питательной среде М9.

Согласно спектрофотометрическому анализу при отсутствии соли ртути максимальную активность в составе алифатической составляющей (вариант 1) микробной трансформации ГNa *in vitro* проявлял штамм *Bacillus sp. 6CC*, изолированный из залива Средний Сандар (рис. 2). При концентрации ртути 10 и 100 мг/л этот штамм сохранял свою активность относительно контроля (варианты 2, 3).

Два других штамма, изолированные из придонных вод, *Pseudomonas sp. 42 НКД* (ниже канала) и *Arthrobacter sp. 59 ВКД* (выше канала) при отсутствии ртути (варианты 1, 4 и 7) мало отличались своей активностью по отношению к разным компонентам (алифатическим, ароматическим и хромофорным) в растворе ГNa.

Штамм *Pseudomonas sp. 42 НКД* проявлял высокую ртуть-резистентность в присутствии 100 мг/л ртути и активно снижал в составе

культуральной жидкости (варианты 3, 6 и 9) содержание алифатических, ароматических и хромофорных компонентов, относительно контроля. Особенность метаболизма *Arthrobacter* sp. 59 ВКД состояла в накоплении этих компонентов в культуральной жидкости. Возможно, при участии штамма *Pseudomonas* sp. 42 НКД в придонных водах в ходе трансформации гуминовых веществ, их ароматическая составляющая способна оказать влияние на метилирование ртути. На примере бактерий из рода *Pseudomonas* установлено, что процесс метилирования ртути происходит в два этапа: сначала биометилирование, а затем – деметилирование. Доказано, что максимальный эффект метилирования достигается в условиях сульфатредукции [29].

Активность трансформации ГНа и ртуть резистентность штаммов из придонных слоёв воды, где происходит активная седиментация ОВ растительного происхождения, служат важной предпосылкой образования метилртути. В ранее опубликованных материалах подтверждается, что продукция метилртути в водохранилищах зависит от разложения растительных остатков и ОВ, присутствующих в затопленных почвах [30]. На продукцию метилртути влияют содержание ароматических групп [31] и прочные связи с другими функциональными группами CO, NH₂ и CN [32].

Оползень и поступившие с поверхностным стоком ОВ растительного происхождения становятся причиной эвтрофирования и повышения гумификации водохранилища. Установлено, что гуминовые вещества, выступая в роли источника углерода для бактерий, предоставляют органические лиганды, связывающие ионы ртути. В результате микробиологических процессов происходит метилирование ртути и изменяется её биодоступность [8]. В условиях эвтрофирования водохранилищ возникают предпосылки для активизации биогеохимического цикла ртути [14, 33], поэтому повышается степень экологического риска образования токсичной метилртути.

Оценка риска воздействия метилртути на гидробионтов в конкретных условиях требует новых методов прогнозирования последствий ртутного загрязнения и понимания сложности круговорота ртути в локальном масштабе [34]. Исследования водных и наземных экосистем указывают на долгосрочную стойкость ртути и сложные механизмы её циркуляции и трансформации в природных условиях [35].

Изменение ландшафта и геоморфологии береговой линии на Бурейском водохранили-

ще вокруг оползня приводят к существенным изменениям в биогеохимии водной среды и свидетельствуют об его уязвимости в результате изменения цикла ртути, особенно в контактной зоне вода–дно.

Заключение

Проведённые исследования показали, что на разных участках вокруг оползня формирование состава воды долгое время будет существенно зависеть от поступивших растительных остатков, их седиментации на дне, изменения уровня гумификации при инфильтрации воды сквозь тело оползня, активности микробных комплексов и ртуть резистентности их отдельных представителей. В качестве биоиндикаторов ртутного загрязнения Бурейского водохранилища в зоне влияния оползня выступают сульфатредуцирующие бактерии с повышенной резистентностью к соединениям ртути. Обнаруженная у выделенных штаммов резистентность к ртути и способность использовать ГВ в качестве источников углерода позволяет прогнозировать вероятность образования более токсичной метилртути вокруг тела оползня. Факторами потенциального риска могут выступать продукты микробной трансформации ГВ, включая летучие ароматические соединения. Многие из них сами по себе относятся к группе экотоксикантов, включая метилированные производные бензола, но также они являются донорами метильных групп при трансформации ртути в более токсичную биодоступную форму метилртути.

Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» ХФИЦ ДВО РАН, финансируемого Российской Федерацией в лице Минобрнауки России по соглашению № 075-15-2025-621.

References

1. Lima A.C., Siyanda D., Wrona F.J. A roadmap for multiple stressors assessment and management in freshwater ecosystems // *Environ. Impact Assess. Rev.* 2023. V. 102. Article No. 107191. doi: 10.1016/j.eiar.2023.107191
2. Poikane S., Salas Herrero F., Kelly M.G., Borja A., Birk S., van de Bund W. European aquatic ecological assessment methods: a critical review of their sensitivity to key pressures // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 740. Article No. 140075. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140075
3. Thieme M., Birnie-Gauvin K., Opperman J.J., Franklin P.A., Richter H., Baumgartner L., Ning N., Vu A.V.,

- Brink K., Sakala M., O'Brien G.C., Petersen R., Tongchai P., Cooke S.J. Measures to safeguard and restore river connectivity // *Environ. Rev.* 2024. V. 32. No. 3. P. 366–386. doi: 10.1139/er-2023-0019
4. Amusan B.O., Adeleke S.O., Koleosho A.F. Assessment of the ecological status of an ancient reservoir using macroinvertebrate assemblage and water quality parameters // *JoBAZ.* 2024. V. 85. Article No. 32. doi: 10.1186/s41936-024-00384-8
5. Biney E.E., Gyamfi Ch., Karikari A.Y., Darko D. Reservoir ecological health assessment methods: a systematic review // *Ecol. Indic.* 2025. V. 171. No. 46. Article No. 113130. doi: 10.1016/j.ecolind.2025.113130
6. Pinto I., Rodrigues S., Lage O.M., Antunes S.C. Assessment of water quality in Aguieira reservoir: ecotoxicological tools in addition to the Water Framework Directive // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2021. V. 208. Article No. 111583. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111583
7. Zona D. Biogeochemistry: long-term effects of permafrost thaw // *Nature.* 2016. V. 537. No. 7622. P. 625–626. doi: 10.1038/537625a
8. Mazur R., Jakubiak M., Santos L. Environmental factors affecting the efficiency of water reservoir restoration using microbiological biotechnology // *Sustainability.* 2024. V. 16. No. 1. Article No. 266. doi: 10.3390/su16010266
9. O'Connor D., Hou D.Y., Ok Y.S., Mulder J., Duan L., Wu Q., Wang S., Tack F.M.G., Rinklebe J. Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: a critical review // *Environ. Int.* 2019. V. 126. No. 9. P. 747–761. doi: 10.1016/j.envint.2019.03.019
10. Larson H.J. The Minamata Convention on Mercury: risk in perspective // *Lancet.* 2014. V. 383. No. 9913. P. 198–199. doi: 10.1016/S0140-6736(13)62000-0
11. Gorokhova A.G., Ivanov A.I., Yazynina N.A., Ermolaev S.E., Ferezanova M.V. Content of mercury in soils and biological objects of natural and technogenic territories // *Theoretical and Applied Ecology.* 2017. No. 4. P. 100–105 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-4-100-105
12. Fukuto J.M., Vega V.S., Works C., Lin J. The chemical biology of hydrogen sulfide and related hydroper-sulfides: interactions with biologically relevant metals and metalloproteins // *Current Opinion in Chemical Biology.* 2020. V. 55. P. 52–58. doi: 10.1016/j.cbpa.2019.11.013
13. Wang X., Lu J.Y., Fang J. Gut microbiota and mercury biotransformation: new perspectives on fish bio-accumulation in China // *Aquat. Toxicol.* 2025. V. 286. Article No. 107474. doi: 10.1016/j.aquatox.2025.107474
14. Peng X., Yang Y., Yang S., Li L., Song L. Recent advance of microbial mercury methylation in the environment // *Appl. Microbiol Biotechnol.* 2024. V. 108. No. 1. Article No. 235. doi: 10.1007/s00253-023-12967-6
15. Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Kremleva T.A., Khoroshavin V.Yu. Aquatic geochemistry of small lakes: effects of environment changes // *Geochem. Int.* 2013. V. 51. No. 13. P. 1031–1148. doi: 10.1134/S0016702913130028
16. Liu Y., Zhi L., Zhou S., Xie F. Effects of mercury binding by humic acid and humic acid resistance on mercury stress in rice plants under high Hg/humic acid concentration ratios // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. V. 27. No. 15. P. 18650–18660. doi: 10.1007/s11356-020-08328-9
17. Makhinov A.N., Makhinova A.F., Levshina S.I. Estimation of soil cover loss due to water-ice tsunami and water quality in the landslide area in the Bureya reservoir // *Meteorologiya i gidrologiya.* 2020. No. 11. P. 64–73 (in Russian).
18. Zerkal O.V., Makhinov A.N., Kudymov A.V., Kharitonov M.E., Fomenko I.K., Barykina O.S. Bureya landslide on 11 December 2018. Conditions of the formation and features of the development mechanism // *GeoRisk World.* 2019. V. 13. No. 4. P. 18–30 (in Russian). doi: 10.25296/1997-8669-2019-13-4-18-303-4-18-30
19. Kondratyeva L.M., Litvinenko Z.N., Filippova G.M. Ecologic risk of volatile organic substances formation after great landslide // *Geokologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya.* 2020. No. 3. P. 167–174 (in Russian). doi: 10.31857/S0869780920030030
20. Zakharov A., Zakharova L. The Bureya landslide recent evolution according to Spaceborne SAR interferometry data // *Remote Sens.* 2022. V. 14. No. 20. Article No. 5218. doi: 10.3390/rs14205218
21. Kumar S. Organic chemistry. Spectroscopy of Organic Compounds. Amritsar: Guru Nanak Dev University, 2006. 265 p.
22. Shirshova L.T., Gilichinsky D.A., Ostroumova N.V., Yermolaev A.M. Application of spectrophotometry for quantification of humic substances in the permafrost sediments // *Earth's Cryosphere.* 2015. V. 19. No. 4. P. 107–113 (in Russian).
23. Bergey's manual of Determinative Bacteriology / Eds. J.G. Holt, N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley, S.T. Williams. Moskva: Mir, 1997. V. 1. 432 p. V. 2. 368 p. (in Russian).
24. Kondratyeva L.M., Litvinenko Z.N., Andreeva D.V., Bashkurova A.S. Change in abundance and activity of micrococci in the area of influence of a large landslide at the Bureya reservoir // *Inland Water Biol.* 2021. V. 14. No. 3. P. 274–283. doi: 10.1134/S1995082921030081
25. Cao D., Chen W., Xiang Y., Mi Q., Liu H., Feng P.Y., Shen H., Zhang C., Wang Y., Wang D. The efficiencies of inorganic mercury bio-methylation by aerobic bacteria under different oxygen concentrations // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2021. V. 207. Article No. 111538. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111538
26. Liu J., Jiang T., Wang F., Zhang J., Wang D., Huang R., Yin D., Liu Z., Wang J. Inorganic sulfur and mercury speciation in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China: the role of inorganic reduced sulfur on mercury methylation // *Envi-*

ron. Pollut. 2018. V. 237. P. 1112–1123. doi: 10.1016/j.envpol.2017.11.045

27. Ran S., He T., Zhou X., Yin D. Effects of fulvic acid and humic acid from different sources on Hg methylation in soil and accumulation in rice // J. Environ. Sci. (China). 2022. V. 119. P. 93–105. doi: 10.1016/j.jes.2022.02.023

28. He T., Feng X., Guo Y., Qiu G., Li Z., Liang L., Lu J. The impact of eutrophication on the biogeochemical cycling of mercury species in a reservoir: a case study from Hongfeng Reservoir, Guizhou, China // Environ. Pollut. 2008. V. 154. No. 1. P. 56–67. doi: 10.1016/j.envpol.2007.11.013

29. Deng Q., Wu X., Wang Y., Liu M. Activity characteristics of sulfate reducing bacteria and formation mechanism of hydrogen sulfide // Appl. Ecol. Environ. Res. 2018. V. 16. No. 5. P. 6369–6383. doi: 10.15666/aer/1605_63696383

30. Feng X., Meng B., Yan H., Fu X., Yao H., Shang L. Biogeochemical cycle of mercury in reservoir systems in Wujiang River Basin, Southwest China. Singapore: Springer, 2018. 420 p. doi: 10.1007/978-981-10-6719-8

31. Waples J.S., Nagy K.L., Aiken G.R., Ryan J.N. Dissolution of cinnabar (HgS) in the presence of natural

organic matter // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. No. 6. P. 1575–1588. doi: 10.1016/j.gca.2004.09.029

32. Maia L.F.O., Hott R.C., Ladeira P.C.C., Batista B.L., Andrade T.G., Santos M.S., Faria M.C.S., Oliveira L.C.A., Monteiro D.S., Pereira M.S., Rodrigues J.L. Simple synthesis and characterization of L-cystine functionalized δ -FeOOH for highly efficient Hg(II) removal from contaminated water and mining waste // Chemosphere. 2019. V. 215. P. 422–431. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.072

33. Suresh K., Tang T., van Vliet M.T.H., Bierkens M.F.P., Stokal M., Sorger-Domenigg F., Wada Y. Recent advancement in water quality indicators for eutrophication in global freshwater lakes // Environ. Res. Lett. 2023. V. 18. Article No. 063004. doi: 10.1088/1748-9326/acd071

34. Hsu-Kim H., Eckley C.S., Achá D., Feng X., Gilmour CC., Jonsson S., Mitchell C.P.J. Challenges and opportunities for managing aquatic mercury pollution in altered landscapes // Ambio. 2018. V. 47. No. 2. P. 141–169. doi: 10.1007/s13280-017-1006-7

35. Kalisińska E., Łanocha-Arendarczyk N., Kosik-Bogacka D.I. Mercury, Hg // Mammals and birds as bio-indicators of trace element contaminations in terrestrial environments / Ed. E. Kalisińska. Cham: Springer, 2019. P. 593–653. doi: 10.1007/978-3-030-00121-6_17

Оценка средообразующих функций болотных экосистем Алтайского государственного природного биосферного заповедника

© 2026. Е. П. Черткова^{1,2}, с. н. с., аспирант,
Д. Г. Замолодчиков², д. б. н., г. н. с.,

¹Алтайский государственный природный биосферный заповедник,
649000, Россия, г. Горно-Алтайск, пер. Набережный, д. 1,

²Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, стр. 14,
e-mail: tchertkova.elena@yandex.ru, dzamolod@mail.ru

Водно-болотные угодья выполняют важнейшие средообразующие функции, однако их экономическая ценность для особо охраняемых природных территорий часто недооценена. Цель работы – определить экономическую ценность водоочистительной функции болот Алтайского заповедника. Исследование выполнено на основе сравнительной оценки эколого-экономической эффективности природных и техногенных систем водоочистки. В 2024 г. проведены натурные гидрохимические исследования качества воды на входе и выходе из болотных массивов площадью 3299 га. В качестве технологического аналога выбрана установка «Векса-20-М», обеспечивающая очистку до нормативов рыбохозяйственных водоёмов. Установлено, что качество воды после болот соответствует данным нормативам (взвешенные вещества 2–6 мг/л, нитраты 0,2–2,1 мг/л). Годовой объём фильтрации составил 273,4 млн м³, а экономический эквивалент водоочистительной функции – 369 млн руб./год. Впервые для болот Алтайского заповедника получена количественная оценка, объединившая натурные данные и экономические расчёты. Результаты могут использоваться для обоснования природоохранных мероприятий и расчёта предотвращённого ущерба на особо охраняемых природных территориях.

Ключевые слова: экосистемные услуги, фильтрующая способность, водно-болотные угодья, особо охраняемые природные территории, экономическая оценка, природный капитал, водоочистные функции.

Evaluation of environment-forming functions of wetland ecosystems in the Altai State Nature Biosphere Reserve

© 2026. E. P. Chertkova^{1,2}, ORCID: 0000-0003-1009-367X¹
D. G. Zamolodchikov², ORCID: 0000-0002-2466-9003²

¹Altai State Natural Biosphere Reserve,

1, Naberezhnyy Lane, Gorno-Altaysk, Russia, 649000,

²Centre for Forest Ecology and Productivity Problems, Russian Academy of Sciences,
14, 84/32, Profsoyuznaya St., Moscow, Russia, 117997,
e-mail: tchertkova.elena@yandex.ru

Wetlands are among the most productive ecosystems, providing a wide range of regulating services, among which the water purification function plays a key role in maintaining the hydrological regime of territories. However, the economic value of these services for protected areas remains insufficiently studied. The aim of this work is to determine the economic value of the water purification function of the mire ecosystems in the Altai State Natural Biosphere Reserve (ASNBR). The work is based on a comparative assessment of the ecological and economic efficiency of natural and technological water treatment systems. The object of the study is the mire ecosystems of the ASNBR, covering a total area of 3,299 hectares. During the 2024 field season, *in situ* hydrochemical studies were conducted to determine the quality of water entering the mire systems and formed after filtration through them. The closed-cycle treatment plant “Veksa-20-M” was selected as a technological analogue, ensuring water purification to fishery reservoir standards, which corresponds to the target water quality at the outlet of the mire ecosystems. Cost calculations for the technological system were performed considering the full life cycle of the equipment (capital costs, depreciation, operating expenses). The filtration volume of the mires was determined based on their area, specific filtration capacity (685 m³/ha/day), and the duration of the frost-free period (121 days). Hydrochemical studies confirmed that the water quality at the outlet of the mire systems meets fishery standards: suspended solids content is 2–6 mg/L, nitrate concentration is 0.2–2.1 mg/L.

The total annual volume of water filtered by the ASNBR mire ecosystems reached 273.4 million m³. The unit cost of water treatment using the technological analogue, considering its full life cycle, was determined to be 1.35 rubles/m³. The economic equivalent of the mires' water purification function is estimated at 369 million rubles/year. Comparative analysis revealed that, with comparable final treatment quality, the natural system is 430 times more productive than the technological one, requires no capital investment, is energy-independent, and, unlike the industrial plant, generates no toxic waste. For the first time, a quantitative assessment of the water purification function has been performed for the mire ecosystems of the ASNBR, based on a comparison with a technological analogue considering its full life cycle. The obtained results can be used to substantiate conservation measures, calculate prevented environmental damage, and in forest management planning materials for protected areas.

Keywords: ecosystem services, filtering capacity, wetlands, specially protected areas, economic valuation, natural capital, water purification functions.

Водно-болотные угодья (ВБУ) признаны одними из наиболее продуктивных и ценных экосистем планеты, предоставляющих широкий спектр регулирующих экосистемных услуг [1, 2]. Их средообразующие функции, такие как регулирование гидрологического режима, очистка воды, депонирование углерода и поддержание биоразнообразия, являются фундаментальными для устойчивого функционирования биосферы [3, 4]. Однако, будучи «невидимыми» для традиционной экономики, эти функции часто недооцениваются.

Научный интерес к болотным (торфяным) экосистемам, их структуре, функционированию и роли в биосфере имеет давнюю историю, однако с конца XX века он приобрёл особую актуальность в контексте глобальных изменений климата и оценки экосистемных услуг [5]. Международное научное сообщество сформировало ряд фундаментальных сводок, заложивших современное понимание болот как динамичных и многофункциональных систем. К ним относятся классические труды по экологии водно-болотных угодий [6], биологии и палеоэкологии торфяников [7, 8], а также региональные монографии, охватывающие болота от Сибири до Огненной Земли [9], Канады [10] и Финляндии [11]. Поворотным моментом стала публикация результатов оценки экосистем на рубеже тысячелетий [12], которая систематизировала вклад экосистем, включая ВБУ, в благосостояние человека. Это заложило основу для интеграции знаний о болотах в проблематику биоразнообразия и климатических изменений, что нашло отражение в крупных международных оценках [13, 14]. Данные работы подчеркнули роль болот как критически важных буферов и регуляторов глобальных биогеохимических циклов, в особенности углеродного, а также их уязвимость в условиях антропогенной эксплуатации [15, 16] и глобального потепления [17]. В России и странах постсоветского пространства исследования болот имеют

глубокие традиции, сфокусированные на их структурно-функциональной организации и региональном разнообразии [18]. Значительный вклад внесли работы по систематике и экологии болот СССР [19], изучению их гидрологических и биогеоценотических особенностей в таёжной зоне [20, 21], а также по исследованию болотных массивов в различных регионах [22, 23]. Развивалось и прикладное направление, связанное с охраной и мониторингом болот на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) [24, 25].

Современный этап исследований характеризуется переходом от чисто экологического описания к экономической оценке функций и услуг болотных экосистем [26]. Этот подход, основанный на концепции общей экономической ценности, позволяет количественно выразить вклад природных систем, включая нерыночные средообразующие и регулирующие услуги, в благосостояние человека. Данная методология успешно апробирована для оценки водно-болотных угодий ООПТ Казахстана [27] и Беларуси [28]. В российской науке также были заложены экономические основы сохранения ВБУ [29, 30]. Однако, несмотря на разработанность общих подходов, количественные, локализованные стоимостные оценки средообразующих функций, основанные на сопоставимых технологических и экологических критериях, для конкретных болотных массивов в составе биосферных резерватов России, остаются фрагментарными. Восполнение этого пробела, в частности, путём комплексного сравнения природных и технологических систем с учётом качества очищаемой воды и полного жизненного цикла технологий, является актуальной научной задачей.

Цель исследования – определить экономическую ценность водоочистительной функции болот Алтайского заповедника путём сравнения затрат на гипотетическую замену этой функции промышленной установкой

«Векса-20-М» с учётом реального качества воды в заповеднике.

Объекты и методы исследования

Работа выполнена на территории Алтайского государственного природного биосферного заповедника (АГПБЗ). Общая площадь заповедника составляет 871 207,6 га, из которых на восточную часть бассейна Телецкого озера приходится 11 844 га. Территория полностью относится к бассейну р. Оби, характеризуется густой гидрографической сетью (плотность 1,5–2,0 км/км²) и сложным горным рельефом с перепадами высот от 400 до 3500 м, что определяет высокое ландшафтное разнообразие [31].

Согласно материалам лесоустройства [32], общая площадь болот АГПБЗ составляет 3299 га. На основе геоботанических описаний [33], Проекта лесохозяйственных работ [34] и данных архива Летописи природы выделены и проанализированы следующие основные типы:

1. Болотисто-ерниковые тундры Чулышманского нагорья. Доминирующий тип высокогорных ВБУ. Эдификатором выступают ерники (*Betula rotundifolia* Spach), в травяно-кустарничковом ярусе преобладают осоки (*Carex* spp.), пушица (*Eriophorum* spp.), разнотравье.

2. Зеленомошные болота. Локально распространены в Прителецком районе и на склонах. Характеризуются сомкнутым покровом из гипновых мхов (*Hypnales*) с участием осок, кустарничков (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Выполняют важную роль в регулировании почвенно-грунтового стока.

3. Травянистые болота. Наиболее распространённый тип, особенно на правобережье р. Чульчи. Отличаются развитым травостоем из гигрофильных видов. Являются ключевыми фильтрационными элементами в поймах малых рек.

4. Комплексы ВБУ Джулукульской котловины. Представляют собой мозаику обводнённых низинных и переходных болот, часто на минеральных субстратах. В растительном покрове сочетаются осоки (доминирует *Carex rostrata* Stokes), сообщества кобрезии (*Kobresia myosuroides* Vill.), ивняки (*Salix* spp.).

Гипотеза исследования: водоочистительная функция болотных экосистем АГПБЗ, оцениваемая с учётом качества воды на выходе для природных экосистем, полного

жизненного цикла технологий и сопутствующих экосистемных услуг, демонстрирует системную экономическую и экологическую эффективность, превосходящую возможности стандартных промышленных очистных технологий для воды со схожим исходным уровнем загрязнения.

Для обоснования выбора технологического аналога и корректности сравнения, авторами в 2024 г. (весенне-летний период) были проведены полевые исследования по отбору проб воды в ключевых пунктах водосборного бассейна заповедника. Пробы отбирались из поверхностного слоя (0,2–0,5 м). Отбор проб воды с поверхности обусловлен задачами исследования: оценка качества вод, формирующихся до и после фильтрации через болотные массивы и поступающих в сеть ВБУ, что соответствует зоне активного водообмена и наиболее репрезентативно для характеристики влияния болотных экосистем на поверхностный сток. Пробы отбирались в местах с хорошо перемешанным потоком и в прибрежной зоне рек и озёр (ГОСТ Р 70282-2022). Целью отбора являлась характеристика качества вод, поступающих в болотные массивы и формирующихся после фильтрации через них. В ходе экспедиционных работ были отобраны пробы в истоках рек, дренирующих Джулукульскую котловину (оз. Джулукуль, р. Богояш), которая представляет собой обширный комплекс ВБУ, а также в реках, непосредственно впадающих в Телецкое озеро (р. Чулышман, р. Кыга, р. Камга, р. Ойер) и в самих заливах озера (Кыгинский, Камгинский), принимающих воды после прохождения через болотные экосистемы (табл. 1).

Лабораторный анализ проб выполнен на базе технопарка «Кванториум 04» (г. Горно-Алтайск), являющегося структурным подразделением автономного учреждения дополнительного образования Республики Алтай «Республиканский центр дополнительного образования». Определение гидрохимических показателей осуществлялось с использованием стандартизированных методик, аттестованных для анализа природных вод (ГОСТ Р 59024-2020). Прозрачность воды определяли визуальным методом (метод Снеллена) с использованием стандартного шрифта [35]. Содержание взвешенных веществ определяли гравиметрическим методом (ГОСТ Р 53692-2023), цветность и запах воды – органолептическим методом (ГОСТ Р 59024-2020), водородный показатель (pH) – потенциометрическим методом (ГОСТ Р 70282-2022), удельную

Таблица 1 / Table 1

Основные характеристики водных объектов Алтайского государственного природного биосферного заповедника (АГПБЗ)
Main characteristics of water bodies in the Altai State Nature Reserve

Название объекта Object name	Координаты (N, E) Coordinates (N, E)	Высота над уровнем моря, м Altitude above sea level, m	Прозрачность, баллы Transparency, points	Взвешенные вещества, г/л Suspended solids, g/L	Цвет Colour	Запах, балл Odour, points	pH	Электропроводность, мСм/см Electrical conductivity, mS/cm	NO ₃ ⁻ , мг/л mg/L	CO ₂ , мг/л mg/L	S, г/л g/L
Источники (поступление в водно-болотные угодья (ВБУ)) / Headwaters (inflow to wetlands)											
оз. Джундукуль Lake Dzhulukul	50.485697, 89.658528	2245	2	0,008	жёлтый yellow	3	8,03	0,05	0,3	2	0,02
р. Богдаш Bogoyash River	50.380317, 89.301283	2286	3	0,0047	жёлтый yellow	3	8,22	0,01	0,5	4	0,02
Транзитные (водотоки, дренирующие ВБУ) / Transit (streams draining wetlands)											
р. Чулышман Chulyshman River	51.088833, 87.995350	523	1	0,0052	жёлтый yellow	4	7,9	0,08	1,4	6,5	0,09
Водокат Учар Uchar Waterfall	51.118483, 88.08340	810	2	0,0036	жёлтый yellow	4	8,6	0,001	0,2	3	0,01
р. Кыга Kuga River	51.338733, 87.881383	514	1	0,006	слабо жёлтый pale yellow	0	8,55	0,09	2,1	4	0,14
р. Камга Kamga River	51.802383, 87.723283	435	1	0,002	слабо жёлтый pale yellow	0	8,16	0,07	1,5	5	0,14
р. Ойер Ойер River	51.778333, 87.362783	428	2	0,02	слабо жёлтый pale yellow	0	8,09	0,04	1,2	5	0,05
Приёмные водоёмы (аккумуляция стока после ВБУ) / Receiving water bodies (accumulation after wetlands)											
Камгинский залив Kamga Bay	51.795054, 87.714439	433	2	0,24	слабо жёлтый pale yellow	0	8,35	0,02	0,6	1	0,15
Кыгинский залив Kuga Bay	51.359768, 87.835686	436	2	0,0012	слабо жёлтый pale yellow	0	8,39	0,09	1,8	5	0,17

электропроводность – кондуктометрическим методом (ГОСТ Р 70282-2022), концентрацию нитрат-ионов (NO_3^-) – фотометрическим методом (ГОСТ 33045-2014), содержание свободного углерода (CO_2) – титриметрическим методом (ГОСТ 31957-2012), сухой остаток (S) – расчётным методом по сумме основных ионов, а для контрольных проб – гравиметрическим методом (ГОСТ 18164-72).

Анализ полученных данных (табл. 1) показывает, что воды, поступающие в болотные системы (оз. Джулукуль, р. Богояш), характеризуются крайне низкой минерализацией (0,02 г/л), что соответствует ультрапресным водам, и низким содержанием взвешенных веществ. Жёлтый цвет вод в верховьях и в реке Чулышман свидетельствует о присутствии гуминовых соединений, выносимых из болот Джулукульской котловины. При этом концентрации нитратов (0,2–2,1 мг/л) находятся в пределах, соответствующих требованиям, предъявляемым к водным объектам рыбохозяйственного назначения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552). Повышенное содержание взвешенных веществ в Камгинском заливе (0,24 г/л) носит, вероятно, эпизодический характер, связанный с ветровым волнением или паводком. Таким образом, целевым показателем качества воды на «выходе» из болотной экосистемы является её соответствие нормативам для рыбохозяйственных водоёмов ($\text{ПДК}_{\text{р/х}}$), как наиболее строгим, регламентирующим безопасность среды обитания для гидробионтов.

Стоимостная оценка фильтрующей функции ВБУ выполнена на основе сравнительной оценки эколого-экономической эффективности природных и техногенных систем водоочистки [2]. Данный подход в рамках исследования адаптирован для корректного сопоставления систем, имеющих принципиально различную природу, путём учёта

полного жизненного цикла технологического аналога и приведения качества очистки к сопоставимым нормативам ($\text{ПДК}_{\text{р/х}}$).

В качестве аналога выбрана установка очистки сточных вод «Векса-20-М» (производитель ГК «Аргель», Россия). Выбор обоснован следующими критериями:

- установка предназначена для очистки поверхностных ливневых, талых и производственных сточных вод до нормативов ПДК для сброса в водные объекты рыбохозяйственного назначения, что соответствует цели поддержания природного качества вод в заповеднике;

- паспортные данные установки (табл. 2) гарантируют снижение содержания загрязняющих веществ (взвешенные вещества, нефтепродукты, химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК_5)) до уровней, соответствующих или лучших, чем наблюдаемые в водотоках заповедника после прохождения болотных массивов;

- производителем установлен гарантийный срок эксплуатации – 5 лет.

Исходные данные для природной системы:

- площадь болот (S) – 3299 га [28];
- удельная фильтрующая способность ($F_{\text{уд}}$) болотных экосистем – 685 $\text{м}^3/\text{га}/\text{сутки}$ [38]. Данная величина отражает интегральную способность торфяной залежи, корнеобитаемого слоя и сопутствующей биоты к физико-химической и биологической очистке воды;

- продолжительность активного функционирования (T) – период с положительными температурами, отсутствие устойчивого снежного покрова и ледостава. На основе климатических данных для территории заповедника принята равной 121 день (середина мая – середина сентября);

- расчёт общего объёма фильтрации ($V_{\text{бол}}$):

$$V = S \cdot F_{\text{уд}} \cdot T.$$

Таблица 2 / Table 2

Паспортные показатели производительности установки «Векса-20-М»
 Certified treatment performance indicators of the Veksa-20-M treatment plant

Показатель / Parameter	На входе в установку (max), мг/л At the inlet (maximum), mg/L	На выходе из установки, мг/л At the outlet, mg/L
Взвешенные вещества Suspended solids	3000	≤ 3
Нефтепродукты Petroleum products	110	≤ 0,05
ХПК / COD	1200	≤ 10
БПК_5 / BOD_5	150	≤ 2

Расчёт затрат для технологического аналога:
– производительность установки «Векса-20-М»: 20 л/с (72 м³/час (1728 м³/сутки));
– рыночная стоимость установки (С) составляет 2 437 000 рублей (Коммерческое предложение ГК «Аргель», 2026 г.).

Для корректного сравнения капитальные затраты распределяются на весь гарантийный срок службы (5 лет). Годовая амортизация равна: $C = 2\,437\,000 \text{ руб.} / 5 \text{ лет} = 487\,400 \text{ руб./год}$.

Результаты и обсуждение

В практике экономических расчётов природоохранных затрат годовые эксплуатационные расходы на оборудование водоочистки оцениваются в размере 10–20 % от капитальных вложений [39]. В настоящем исследовании принята величина 15 % от стоимости оборудования: годовые эксплуатационные затраты ($C_{\text{экс}}$) = 2 437 000 руб. · 0,15 = 365 550 руб./год.

Суммарные годовые затраты на одну промышленную очистную установку (ПОУ) ($C_{\text{поу.год}}$) составляют: $C_{\text{поу.год}} = \text{годовые амортизационные отчисления} (C_{\text{кап.год}}) + C_{\text{экс}} = 487\,400 + 365\,550 = 852\,950 \text{ руб./год}$.

Производительность одной ПОУ в год ($V_{\text{поу.год}}$) (при круглогодичной работе): $V_{\text{поу.год}} = 1728 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot 365 \text{ сут} = 630\,720 \text{ м}^3/\text{год}$.

Удельная стоимость очистки 1 м³ воды на ПОУ ($C_{\text{уд.поу}}$): $C_{\text{уд.поу}} = C_{\text{поу.год}} / V_{\text{поу.год}} = 852\,950 / 630\,720 \approx 1,35 \text{ руб./м}^3$.

Оценка стоимостного эквивалента услуги природных болот ($C_{\text{бол}}$): $C_{\text{бол}} = \text{суммарный объём воды, фильтруемой болотными экосистемами за безморозный период} (V_{\text{бол}}) \cdot C_{\text{уд.поу}}$.

Суммарный объём воды, проходящей через фильтрационный комплекс болот АГПБЗ за безморозный период, составил:

$V_{\text{бол}} = 3299 \text{ га} \cdot 685 \text{ м}^3/\text{га/сут} \cdot 121 \text{ сут} = 273\,437\,615 \text{ м}^3$.

Стоимость очистки 1 м³ воды, рассчитанная через полные годовые затраты на установку «Векса-20-М», составила 1,35 руб./м³. Соответственно, годовой стоимостный эквивалент водоочистительной услуги болот заповедника оценивается в: $C_{\text{бол}} = 273\,437\,615 \text{ м}^3 \cdot 1,35 \text{ руб./м}^3 = 369\,140\,780 \text{ руб.}$

Проведённое исследование позволило не только получить конкретную стоимостную оценку одной из ключевых средообразующих функций болотных экосистем, но и апробировать методику корректного сопоставления природных и техногенных систем очистки с учётом их принципиально разной природы.

Главный методический вызов заключался в обосновании сопоставимости целей очистки. Полученные натурные гидрохимические данные (табл. 1) подтвердили, что качество воды на входе в болотные массивы и на выходе из них соответствует категории «условно чистых» вод, а целевым показателем для сравнения являются нормативы качества воды рыбохозяйственных водоёмов (ПДК_{р/х}). Выбор установки «Векса-20-М», паспортные характеристики которой гарантируют достижение именно этих нормативов, является методологически строгим.

Сравнительный анализ химических показателей (табл. 1 и 2) показывает, что качество воды на выходе из болотных экосистем и паспортные характеристики установки «Векса-20-М» являются сопоставимыми по основным нормируемым показателям: содержание взвешенных веществ в водотоках после болот (в среднем 2–6 мг/л) близко к гарантированному показателю установки ($\leq 3 \text{ мг/л}$); концентрации нитратов (0,2–2,1 мг/л) на порядки ниже ПДК_{р/х} (40 мг/л), что соответствует целям очистки. Принципиальное различие заключается не в финальном «химическом составе», а в «природном фоне»: болотные воды сохраняют естественную слабощелочную среду (pH 7,8–8,6) и содержат гуминовые вещества (обуславливающие жёлтый цвет), которые являются не загрязнителями, а неотъемлемым компонентом природных вод таёжной зоны. Техногенная система, достигая нормативов ПДК, производит воду, лишённую этих естественных компонентов, и, кроме того, генерирует отходы в виде насыщенных сорбентов, требующих утилизации. Полученная оценка в 369 млн рублей в год отражает гипотетические затраты на замещение только фильтрационной функции болот техногенными средствами. Важно подчеркнуть, что эта цифра не является «доходом» заповедника, а представляет собой предотвращённый ущерб или, иными словами, «безвозмездные услуги» природы. Критическое преимущество природных систем раскрывается при анализе полного жизненного цикла. Установка «Векса-20-М» за 5 лет эксплуатации накопит несколько тонн отработанных сорбентов, насыщенных нефтепродуктами и тяжёлыми металлами (III–IV класс опасности), которые потребуют вывоза, захоронения или регенерации, что создаст дополнительную нагрузку на окружающую среду. Болотная экосистема, напротив, является безотходной и самоподдерживающейся. Аккумулированные загрязнители (в данном

случае – фоновые) включаются в естественный биогеохимический круговорот и не требуют утилизации. Это делает болота не просто «очистным сооружением», а элементом глобальной системы поддержания биосферного гомеостаза.

Заключение

Выдвинутая гипотеза получила эмпирическое и расчётное подтверждение. Установлено, что водоочистительная функция болотных экосистем Алтайского заповедника обеспечивает ежегодную фильтрацию 273,4 млн м³ воды с качеством, соответствующим рыбохозяйственным нормативам (взвешенные вещества 2–6 мг/л, нитраты 0,2–2,1 мг/л). Экономический эквивалент данной функции, полученный в результате сравнительной оценки эколого-экономической эффективности природной системы и установки «Векса-20-М», с учётом полного жизненного цикла, составляет 369 млн рублей в год, что демонстрирует системное превосходство болотных экосистем над техногенными аналогами по масштабу, энергоэффективности и экологической безопасности.

Впервые для болотных массивов Алтайского заповедника выполнена оценка, объединившая натурные гидрохимические данные и экономические расчёты. Показано, что природные системы не только сопоставимы с техногенными по конечному качеству очистки воды, но и обладают неопределимыми преимуществами: поддержанием естественного гидрохимического фона (гуминовые вещества, слабощелочная среда) и отсутствием отходов, тогда как эксплуатация очистных установок сопровождается образованием токсичных сорбентов III–IV класса опасности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации (тема № 125121914673-8 Многолетняя динамика экосистем, природных ландшафтов и природных комплексов Алтайского государственного заповедника: изучение естественного хода процессов и явлений в целях обеспечения сохранения природной среды, в том числе естественных экологических систем, объектов животного и растительного мира (1-22-2-1) а также в рамках государственного задания ЦЭПЛ РАН «Биоразнообразие и экосистемные функции лесов» (Регистрационный номер НИОКТР 124013000750-1).

Литература

1. Barbier E.B., Acreman M., Knowler D. Economic valuation of wetlands: a guide for policy makers and planners. Gland: Ramsar Convention Bureau, 1997. 127 p.
2. Brander L.M., Florax R.J.G.M., Vermaat J.E. The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature // Environ. Resource. Econ. 2006. V. 33. P. 223–250. doi: 10.1007/s10640-005-3104-4
3. Экосистемы болот // Состояние биоразнообразия природных экосистем России / под ред. В.А. Орлова, А.А. Тишкова. М.: НИА-Природа, 2004. С. 103.
4. Сирин А.А. Торфяные болота: свойства, функции, экосистемные услуги // Материалы конференции «Х Галкинские Чтения». СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2019. С. 183–185.
5. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital // Nature. 1997. V. 387. P. 253–260. doi: 10.1038/387253a0
6. Mitsch W.J., Gosselink J.G. Wetlands. New York: John Wiley & Sons, 2000. 920 p.
7. Rydin H., Jeglum J.K. The Biology of Peatlands. Oxford; New York: Oxford University Press, 2006. 343 p.
8. Charman D. Peatlands and environmental change. Chichester: Wiley, 2002. 301 p.
9. Mires: from Siberia to Tierra del Fuego / Ed. G.M. Steiner. Linz: Biologiezentrum der Oberösterreichischen Landesmuseen, 2005. 626 p.
10. Tarnocai C., Kettles I.M., Lacelle B. Peatlands of Canada [Электронный ресурс] <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/entities/publication/4b928f32-3a2b-4b88-ba2c-03df49dfa451> (дата обращения: 23.11.2025). doi: 10.4095/288786
11. Peatlands in Finland / Ed. H. Vasander. Helsinki: Finnish Peatland Society, 1996. 168 p.
12. Landschaftsökologische Moorkunde / Eds. M. Succow, H. Joosten. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2001. 622 p.
13. Steiner G.M. Österreichischer Moorschutzkatalog. Wien: Grüne Reihe des Bundesministeriums für Umwelt, 2000. 509 p.
14. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: wetlands and water: synthesis / Eds. J. Sarukhán, A. Whyte. Washington, DC: World Resources Institute, 2005. 68 p.
15. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report / Eds. F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius, L. Stringer. Kuala Lumpur; Wageningen: Global Environment Centre; Wetlands International, 2008. 179 p.
16. Вомперский С.Э., Сирин А.А., Глухова Т.В., Цыганова О.П., Валяева Н.А. Запас углерода в тор-

фах болот Российской Федерации (новый подход) // Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы VII междунар. полевого симпозиума. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2024. С. 75–77.

17. Peatlands and Climate Change / Ed. M. Struck. Saarijärvi: International Peat Society, 2008. 223 p.

18. Возбранная А.Е., Антипин В.К., Бойчук М.А., Миронов В.Л., Сирин А.А. Мониторинг восстановительной динамики болотной растительности ранее разрабатываемых торфяников Национального парка «Мещера» // VIII Галкинские Чтения: материалы конф. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 17–20.

19. Chapman S., Buttler A., Francez A.-J., Laggoun-Défarage F., Vasander H., Schloter M., Combe J., Grosvernier P., Harms H., Epron D., Gilbert D., Mitchell E. Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance: a conflict between economy and ecology // Front. Ecol. Environ. 2003. V. 1. No. 10. P. 525–532. doi: 10.1890/1540-9295(2003)001[0525:EONPAB]2.0.CO;2.

20. Erwin K.L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world // Wetlands Ecol. Manage. 2009. V. 17. P. 71–84. doi: 10.1007/s11273-008-9119-1

21. Боч М.С., Мазинг В.В. Экосистемы болот СССР. Л.: Наука, 1979. 186 с.

22. Егоров К.П., Медведева М.А., Галанина О.В., Сирин А.А. Изменение облесенности верховых болот за последние десятилетия: некоторые данные (на примере объектов Западновинского лесоболотного стационара ИЛАН РАН, Тверская область) // Материалы конференции «XII Галкинские Чтения – Типы болот регионов России». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. С. 71–73.

23. Елина Г.А., Кузнецов О.Л., Максимов А.И. Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии. Л.: Наука, 1984. 128 с.

24. Прозоров Ю.С. Болота Нижнеамурских низменностей. Новосибирск: Наука, 1974. 210 с.

25. Николаев В.И. Болота Верхневолжья. Птицы. М.: Изд-во Рус. ун-та, 2000. 216 с.

26. Ямпольский А. Л. Методика эколого-экономической оценки торфяных болот // Труды Инсторфа. 2010. № 2. С. 3–10.

27. Минаева Т.Ю., Глушков И., Носова Н.Б., Стародубцева О.А., Кураева Е.Н., Волкова Е.М. Очерк болот Центрально-Лесного заповедника // Труды Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника. Вып. 4. Комплексные исследования в Центрально-Лесном государственном природном биосферном заповеднике: их прошлое, настоящее и будущее. Тула: Гриф и К, 2007. С. 267–296.

28. Бутовский Р.О., Райнен Р., Онагов Д.М., Алещенко Г.М., Мелик-Багдасаров Д.М., Еремкин Г.С., Есенова И.М. Сохранение природы торфяных болот Центральной и Северной Мещеры. М.: Alterra-report 225, 2001. 120 с.

29. Тимохина Ю.И., Калущкова Н.Н., Голубева Е.И. Оценка экосистемных функций водно-болотных угодий особо охраняемых природных территорий Казахстана // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 4. С. 45–58.

30. Груммо Д.Г., Зеленкевич Н.А., Созинов О.В., Мойсейчик Е.В. Эколого-экономическая оценка экосистемных услуг при оптимизации гидрологического режима верхового болота Ельня (Беларусь) // Социально-экологические технологии. 2016. № 1. С. 57–66.

31. Методы исследований болотных экосистем таёжной зоны / Отв. ред. О.Л. Кузнецов. Л.: Наука, 1991. 127 с.

32. Бобылев С.Н., Захаров В.М. Экосистемные услуги и экономика. М.: ООО «Типография ЛЕВКО», Институт устойчивого развития / Центр экологической политики России, 2009. 72 с.

33. Наблюдение и изучение явлений и процессов в природном комплексе заповедника по программе Летописи природы: научный отчёт. Горно-Алтайск: ФГБУ «Алтайский государственный заповедник», 2024. Т. 51. 452 с.

34. Проект организации и ведения лесного хозяйства Алтайского государственного природного заповедника Республики Алтай «Западно-Сибирское государственное лесоустроительное предприятие» Омский филиал. Омск, 2004. 375 с.

35. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть 2 / Под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону: Издательство Южного Федерального Университета, 2012. 720 с.

36. Седельников В.П. Высокогорная растительность Алтае-Саянской горной области. Новосибирск: Наука, 1988. 223 с.

37. Лесохозяйственный регламент ФГБУ «Алтайский государственный природный заповедник». Горно-Алтайск: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2022. 90 с.

38. Технический кодекс установившейся практики ТКП 17.02-10-2013 (02120). Порядок стоимостной оценки экосистемных услуг и определения стоимостной ценности биологического разнообразия. Минск: Мин-природы, 2013. 25 с.

39. Бобылев С.Н., Сидоренко В.Н., Лужецкая Н.В. Экономические основы сохранения водно-болотных угодий. М.: Wetlands international, 2001. 56 с.

References

1. Barbier E.B., Acreman M., Knowler D. Economic valuation of wetlands: a guide for policy makers and planners. Gland: Ramsar Convention Bureau, 1997. 127 p.

2. Brander L.M., Florax R.J.G.M., Vermaat J.E. The empirics of wetland valuation: a comprehensive summary and a meta-analysis of the literature // Environ. Resource. Econ. 2006. V. 33. P. 223–250. doi: 10.1007/s10640-005-3104-4

3. Wetland ecosystems // State of biodiversity of natural ecosystems in Russia / Eds. V.A. Orlov, A.A. Tishkov. Moskva: NIA-Priroda, 2004. P. 103. (in Russian).
4. Sirin A.A. Peatlands: properties, functions, ecosystem services // Proceedings of the “X meeting in memoriam of Ekaterina Alexeevna Galkina”. Sankt-Peterburg: Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI”, 2019. P. 183–185 (in Russian).
5. Costanza R., d’Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O’Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world’s ecosystem services and natural capital // *Nature*. 1997. V. 387. P. 253–260. doi: 10.1038/387253a0
6. Mitsch W.J., Gosselink J.G. Wetlands. New York: John Wiley & Sons, 2000. 920 p.
7. Rydin H., Jeglum J.K. The Biology of Peatlands. Oxford; New York: Oxford University Press, 2006. 343 p.
8. Charman D. Peatlands and environmental change. Chichester: Wiley, 2002. 301 p.
9. Mires: from Siberia to Tierra del Fuego / Ed. G.M. Steiner. Linz: Biologiezentrum der Oberösterreichischen Landesmuseen, 2005. 626 p.
10. Tarnocai C., Kettles I.M., Lacelle B. Peatlands of Canada [Internet resource] <https://ostrnrcanadostrnrcan.canada.ca/entities/publication/4b928f32-3a2b-4b88-ba2c-03df49dfa451> (Accessed: 23.11.2025). doi: 10.4095/288786
11. Peatlands in Finland / Ed. H. Vasander. Helsinki: Finnish Peatland Society, 1996. 168 p.
12. Landschaftsökologische Moorkunde / Eds. M. Succow, H. Joosten. Stuttgart: Schweizerbart’sche Verlagsbuchhandlung, 2001. 622 p. (in German).
13. Steiner G.M. Österreichischer Moorschutzkatalog. Wien: Grüne Reihe des Bundesministeriums für Umwelt, 2000. 509 p. (in German).
14. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: wetlands and water: synthesis / Eds. J. Sarukhán, A. Whyte. Washington, DC: World Resources Institute, 2005. 68 p.
15. Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report / Eds. F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M. Silvius, L. Stringer. Kuala Lumpur; Wageningen: Global Environment Centre; Wetlands International, 2008. 179 p.
16. Vomperskiy S.E., Sirin A.A., Glukhova T.V., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A. Carbon stock in peats of Russian Federation wetlands (a new approach) // West Siberian peatlands and carbon cycle: past and present: proceedings of the seventh international field symposium. Tomsk: Publishing house of Tomsk State University, 2024. P. 75–77 (in Russian).
17. Peatlands and Climate Change / Ed. M. Struck. Saarijärvi: International Peat Society, 2008. 223 p.
18. Vozbrannaya A.E., Antipin V.K., Boychuk M.A., Mironov V.L., Sirin A.A. Monitoring recovery dynamics of mire vegetation for previously used for extraction peatlands National Park “Meschera” // Proceedings of the “VIII meeting in memoriam of Ekaterina Alexeevna Galkina”. Sankt-Peterburg: Publishing house “LETI”, 2017. P. 17–20 (in Russian).
19. Chapman S., Buttler A., Francez A.-J., Laggoun-Défarce F., Vasander H., Schloter M., Combe J., Grosvernier P., Harms H., Epron D., Gilbert D., Mitchell E. Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance: a conflict between economy and ecology // *Front. Ecol. Environ.* 2003. V. 1. No. 10. P. 525–532. doi: 10.1890/1540-9295(2003)001[0525:EONPAB]2.0.CO;2
20. Erwin K.L. Wetlands and global climate change: the role of wetland restoration in a changing world // *Wetlands Ecol. Manage.* 2009. V. 17. P. 71–84. doi: 10.1007/s11273-008-9119-1
21. Boch M.S., Mazing V.V. Ecosystems of the USSR mires. Leningrad: Nauka, 1979. 186 p. (in Russian).
22. Egorov K.P., Medvedeva M.A., Galanina O.V., Sirin A.A. Changes in the forest cover of raised bogs over recent decades: some data (case study of the objects of the West Dvina forest-peatland research station, Tver region) // Proceedings of the “XII meeting in memoriam of Ekaterina Alexeevna Galkina – Types of mires of Russian regions”. Sankt-Peterburg: Publishing house “LETI”, 2023. P. 71–73 (in Russian).
23. Elina G.A., Kuznetsov O.L., Maksimov A.I. Structural and functional organization and dynamics of mire ecosystems in Karelia. Leningrad: Nauka, 1984. 128 p. (in Russian).
24. Prozorov Yu.S. Mires of the Lower Amur lowlands. Novosibirsk: Nauka, 1974. 210 p. (in Russian).
25. Nikolaev V.I. Mires of the Upper Volga region. Birds. Moskva: Russkiy universitet Publ., 2000. 216 p. (in Russian).
26. Yampolskiy A.L. Method of ecological and economic evaluation of mires // *Trudy Instorfa*. 2010. No. 2. P. 3–10 (in Russian).
27. Minayeva T.Yu., Glushkov I., Nosova N.B., Starodubtseva O.A., Kuraeva E.N., Volkova E.M. An essay on the mires of the Central Forest Reserve // Proceedings of the Central Forest State Natural Biosphere Reserve. No. 4. Integrated studies in the Central-Forest State Nature Biosphere Reserve: their past, present and future. Tula: Grif i K, 2007. P. 267–296 (in Russian).
28. Butovskiy R.O., Raynen R., Onagov D.M., Aleshchenko G.M., Melik-Bagdasarov D.M., Eremkin G.S., Esenova I.M. Protection of peatbogs of Central and Northern Meshchera. Moskva: Alterra-report 225, 2001. 120 p. (in Russian).
29. Timokhina Yu.I., Kalutskova N.N., Golubeva E.I. Evaluation of wetlands ecosystem functions of Kazakhstan specially protected natural areas // *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*. 2017. V. 1. No. 4. P. 45–58 (in Russian).
30. Grummo D.G., Zelenkevich N.A., Sozinov O.V., Moyseychik E.V. Ecological and economic evaluation of ecosystem services in the optimization of the hydrological

regime of raised bogs “Yelnya” (Belarus) // Social and Environmental Technologies. 2016. No. 1. P. 57–66 (in Russian).

31. Research methods of mire ecosystems in the taiga zone / Ed. O.L. Kuznetsov. Leningrad: Nauka, 1991. 127 p. (in Russian).

32. Bobylev S.N., Zakharov V.M. Ecosystem services and economics. Moskva: “Tipografiya LEVKO” JSC, Institute for Sustainable Development / Center for Russian Environmental Policy, 2009. 72 p. (in Russian).

33. Observation and study of phenomena and processes in the natural complex of the reserve according to the program of the Chronicle of Nature: scientific report. Gorno-Altaysk: Altai State Nature Reserve, 2024. V. 51. 452 p. (in Russian).

34. Project for the organization and management of forestry in the Altai State Nature Reserve of the Altai Republic “West Siberian State Forest Inventory Enterprise” Omsk branch. Omsk, 2004. 375 p. (in Russian).

35. Guide to the chemical analysis of surface waters. Pt. 2 / Ed. L.V. Boeva. Rostov-on-Don: Southern Federal University Press, 2012. 720 p. (in Russian).

36. Sedelnikov V.P. High-mountain vegetation of the Altai-Sayan mountain region. Novosibirsk: Nauka, 1988. 223 p. (in Russian).

37. Forest management regulations of the Altai State Nature Reserve. Gorno-Altaysk: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, 2022. 90 p. (in Russian).

38. Technical Code of Established Practice TCP 17.02-10-2013 (02120). Procedure for the monetary valuation of ecosystem services and determining the monetary value of biological diversity. Minsk: Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 2013. 25 p. (in Russian).

39. Bobylev S.N., Sidorenko V.N., Luzhetskaya N.V. Economic basis for wetland conservation. Moskva: Wetlands international, 2001. 56 p. (in Russian).

Комплексная оценка качества питьевой воды на участках водозаборных сооружений

© 2026. Т. В. Шевкунова^{1,2}, аспирант,С. С. Катын¹, главный врач,Е. Н. Патова³, к. б. н., в. н. с.,¹Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми,

167000, Россия, г. Сыктывкар, ул. Димитрова, д. 3/3,

²Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина,

167000, Россия, г. Сыктывкар, Октябрьский пр., д. 55,

³Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: patova@ib.komisc.ru

Целью работы является комплексная оценка качества воды р. Вычегды на участках расположения действующих водозаборных сооружений (станция 1 – Красная гора и станция 2 – Эжвинский район) г. Сыктывкара. В основе исследования лежат данные двухлетнего (2022–2023 гг.) ежемесячного мониторинга. Проанализированы основные гидрохимические (рН, цветность, мутность, общая минерализация, жёсткость, БПК₅, ХПК, Fe_{общ}, Mn, Zn, As, Al, Pb, пестициды, фенолы, формальдегиды, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻) и микробиологические (ОКБ) показатели. Установлено, что гидрохимический режим реки характеризуется выраженной сезонной динамикой с пиковыми значениями цветности, мутности и содержанием органических веществ (по ХПК) в период весеннего половодья. Вода реки классифицируется как слабоминерализованная. Ключевым результатом является выявление устойчивого превышения гигиенических нормативов (ПДК) по содержанию Fe_{общ} (до 2,7 мг/дм³) и Mn (до 0,9 мг/дм³) на всём исследуемом участке в районе двух станций, а также периодических значительных превышений по цветности (до 160°), ХПК (до 58 мгО₂/дм³) и микробиологическим показателям (ОКБ до 700 КОЕ/100 см³). Полученные данные свидетельствуют о том, что основное ухудшение качества воды обусловлено природными факторами (гумусовый сток, выщелачивание металлов), однако выявленные пространственные различия указывают на наличие локальных антропогенных воздействий. Делается вывод о необходимости дифференцированного подхода к водоподготовке на водозаборах с обязательной очисткой от соединений Fe, Mn и органических веществ, а также усиленного контроля за качеством воды в период паводка.

Ключевые слова: качество воды, питьевое водоснабжение, поверхностная вода, гидрохимические показатели, превышение нормативов, мониторинг.

Comprehensive assessment of drinking water quality at water intake sites

© 2026 T. V. Shevkunova^{1,2}ORCID: 0009-0004-9026-927X^{*}S. S. Katin¹ORCID: 0009-0008-9635-1927^{*}E. N. Patova³ORCID: 0000-0002-9418-1601^{*}¹Federal Budgetary Institution of Health Care

“Center for Hygiene and Epidemiology in the Komi Republic”,

3/3, Dimitrova St., Syktyvkar, Russia, 167000,

²Pitirim Sorokin Syktyvkar State University,

55, Oktyabrskiy Ave., Syktyvkar, Russia, 167000,

³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

e-mail: patova@ib.komisc.ru

The aim of this work is a comprehensive assessment of the Vychegda River water quality at the sites of Syktyvkar water intake facilities (Station 1 – Krasnaya Gora and Station 2 – Ezhvinskiy District). The study is based on data from a two-year (2022–2023) monthly monitoring program conducted at two stations located in the areas of active water intakes. The main hydrochemical (pH, color, turbidity, total dissolved solids, hardness, BOD₅, COD, total Fe, Mn, Zn, As, Al, Pb, pesticides, phenols, formaldehyde, Cl⁻, SO₄²⁻, F⁻) and microbiological (total coliform bacteria, TCB) parameters were analyzed. The river's hydrochemical regime has pronounced seasonal dynamics, with peak values of color, turbidity, and organic indicators (COD) during the spring flood period. The river water is classified as low-mineralized. A key finding is the identification of consistent exceedance of hygienic standards (maximum permissible concentrations, MPC) for total Fe (up to 2.7 mg/dm³) and Mn (up to 0.9 mg/dm³) throughout the studied section at both stations, as well as periodic significant exceedance for color (up to 160°), COD (up to 58 mgO₂/dm³), and microbiological indicators (TCB up to 700 CFU/100 cm³). The obtained data indicate that the main deterioration in water quality is due to natural factors (humic runoff, metal leaching); however, the identified spatial differences point to the presence of localized anthropogenic impacts. It is concluded that a differentiated approach to water treatment at the intakes is necessary, with mandatory removal of Fe, Mn, and organic compounds, as well as enhanced control during the flood period.

Keywords: water quality, drinking water supply, surface water, hydrochemical parameters, MPC exceedance, water monitoring.

Систематический мониторинг качества поверхностных вод, используемых для питьевого водоснабжения, является важнейшим элементом обеспечения экологической безопасности и охраны здоровья населения [1]. Для рек, испытывающих значительную антропогенную нагрузку, такой контроль позволяет не только оперативно выявлять отклонения от нормативов, но и оценивать долгосрочные тенденции изменения гидрохимического режима, что необходимо для разработки эффективных природоохранных мер.

Ключевым водным объектом Республики Коми является р. Вычегда – второй по величине приток Северной Двины, играющий ведущую роль в водоснабжении региона [2]. В пределах г. Сыктывкара, столицы республики, р. Вычегда служит основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения, одновременно подвергаясь воздействию многочисленных природных и антропогенных факторов. К наиболее значимым естественным факторам относится высокая заболоченность водосбора, определяющая гидрологический режим, в частности, характер стока в летне-осенний период, длительность половодья и специфику формирования качества воды [3]. Среди антропогенных факторов основными являются сбросы (расположены после водозаборных станций) очищенных сточных вод АО «Сыктывкарский ЛПК» и коммунально-бытовой канализации, а также диффузное загрязнение с урбанизированных территорий [4, 5]. Существенное влияние на термический режим реки оказывает тепловое загрязнение, фиксируемое на протяжении до 15 км ниже мест сброса воды из очистных сооружений АО «Сыктывкарский ЛПК» [6].

Согласно данным государственного мониторинга, качество воды в р. Вычегде на участке г. Сыктывкара в 2022–2023 гг. характеризова-

лось как «загрязнённая» (3 класс, разряд «а») по величине удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ) [7]. Однако сводные оценки такого типа, как правило, не детализируют, превышение каких именно показателей обусловило данный класс, и не отражают пространственно-временной изменчивости загрязнения в критически важных местах – непосредственно в районе водозаборных сооружений. Таким образом, существует актуальная потребность в целенаправленном и детальном анализе гидрохимического состояния р. Вычегды в зоне непосредственного водопользования г. Сыктывкара.

Цель данного исследования – комплексная оценка гидрохимического и микробиологического состояния вод р. Вычегды в черте г. Сыктывкара с акцентом на районы водозаборов питьевого водоснабжения.

Объекты и методы исследования

В работе были поставлены следующие задачи: определить актуальный уровень содержания основных приоритетных загрязняющих веществ и биогенных элементов в воде р. Вычегды на двух исследуемых участках (станция 1 – Красная гора, станция 2 – Эжвинский район); оценить пространственно-временную динамику гидрохимических показателей в зоне водозаборных сооружений на двух станциях; провести анализ степени соответствия полученных данных гигиеническим нормативам для водных объектов хозяйственно-питьевого водопользования.

Район и объекты исследований. Исследования проводили в 2022–2023 гг. в пределах г. Сыктывкара на р. Вычегде (рис. 1а). Объектом исследования являлась поверхностная вода, отбираемая ежемесячно на двух мониторинговых точках, расположенных в зонах

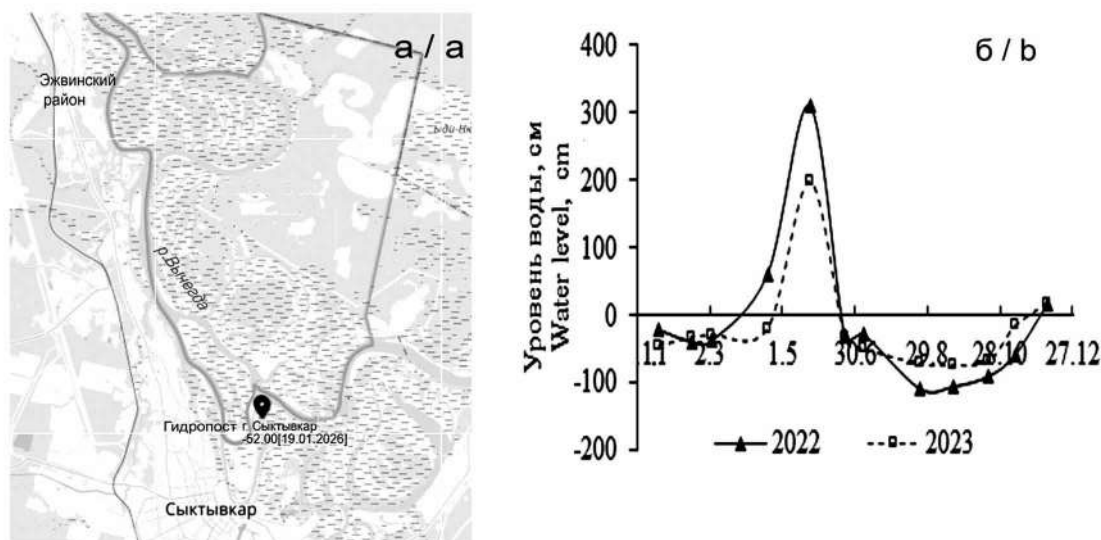


Рис. 1. Карта-схема района исследований (а) и показатели уровня воды в р. Вычегде в 2022 и 2023 гг. по данным для гидропоста г. Сыктывкара (б). По оси абсцисс – даты наблюдений.

Карта-схема и уровень воды приведены с использованием материала сайта AllRivers.info [8]

Fig. 1. Map of the research area (a) and water level indicators in the Vychegda River in 2022 and 2023 based on data from the Syktyvkar hydrographic post (b). The map and water level were provided using material from the AllRivers.info website [8]

действующих водозаборных сооружений: станция 1 (ст. 1) – в микрорайоне Красная Гора, станция 2 (ст. 2) – в Эжвинском районе (расстояние между станциями около 15 км). Выбор створов обусловлен необходимостью оценки качества исходной воды непосредственно в местах её забора для последующей водоподготовки. Уровень воды в р. Вычегде за 2022–2023 гг. приведён по данным сайта AllRivers.info [8] для гидропоста г. Сыктывкар на р. Вычегде (рис. 1а). Климатические сведения приведены по данным сайта gr5.ru [9].

Отбор и хранение проб. Ежемесячный отбор проб поверхностной воды проводился в 2022–2023 гг. на двух станциях, соответствующих водозаборным сооружениям г. Сыктывкара. Отбор, консервация и транспортировка проб выполнялись в соответствии с требованиями действующих нормативных документов ГОСТ Р 59024-2020 и ГОСТ 31942-2012.

Определяемые показатели и методы. Все гидрохимические и микробиологические определения выполнены в аккредитованной лаборатории ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми». Анализ проводился по стандартизированным и аттестованным методикам, включённым в область аккредитации ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Коми».

Для оценки качества воды определялся комплекс показателей, включающий общие физико-химические характеристики (водо-

родный показатель (рН), общая минерализация, жёсткость, цветность, мутность); показатели органического загрязнения (химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅); неорганические компоненты и микроэлементы (общее железо (Fe), марганец (Mn), а также другие металлы (включая тяжёлые); микробиологические показатели (общие колиформные бактерии (ОКБ)). Измерения проводились с использованием следующего комплекса инструментальных методов: потенциометрия (рН); титриметрия (ХПК); фотометрия/спектрофотометрия (цветность, мутность, Fe, Mn); атомно-абсорбционная спектрометрия (тяжёлые металлы); гравиметрия (минерализация); высокоэффективная жидкостная и газожидкостная хроматография (органические соединения); мембранно-фильтрационный метод (микробиологический анализ). На рисунке 2 приведены средние арифметические значения для исследованных показателей.

Оценка качества воды. Для оценки состояния водного объекта проведён нормативный анализ и рассчитан интегральный показатель. Каждый определяемый показатель сравнивался с предельно допустимой концентрацией (ПДК), установленной для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования согласно СанПиН 1.2.3685-21. Для комплекс-

ной оценки уровня загрязнения рассчитан УКИЗВ, позволяющий учитывать совокупное воздействие исследуемых гидрохимических показателей и характеризовать общий уровень загрязнения водного объекта за исследуемый период. Расчёт УКИЗВ проведён по обязательному перечню показателей в соответствии с РД 52.24.643-2002 для каждой станции отбора проб. Класс качества воды устанавливался на основе полученных значений УКИЗВ в соответствии с действующей методикой.

Результаты и обсуждение

Климатическая характеристика периода исследований (2022–2023 гг.). Метеорологические условия являются важным фактором, формирующим химический состав природных вод, поскольку влияют на термодинамику (например, растворимость газов) и скорость биогеохимических процессов. Период проведения исследований (2022–2023 гг.) характеризовался типичным для г. Сыктывкара умеренно-континентальным климатом [10]. Летние месяцы были достаточно тёплыми: в июле 2022 г. среднемесячная температура воздуха составляла 19,8 °С (максимальная 32,3 °С), в 2023 г. – 18,4 °С (максимальная 31,2 °С). Средние температуры зимних месяцев 2023 г. были ниже, чем в 2022 г. (-11,2 и -9,7 °С соответственно). При этом абсолютный минимум за весь период наблюдений -32,9 °С был зафиксирован в декабре 2023 г. Стоит отметить необычно тёплый май 2023 г. со среднемесячной температурой 11,84 °С против 7,64 °С годом ранее [9].

Гидрологический режим и его влияние на физико-химические показатели. Река Вычегда имеет смешанное питание с ярко выраженным преобладанием весеннего половодья за счёт талых вод (58–65 % годового стока) [11]. Летне-осенняя межень обеспечивает 26–33 % стока, а зимняя – около 9 %. Гидрологические фазы напрямую определяют динамику гидрохимических показателей: весеннее половодье (апрель–май) – ключевой период поступления загрязняющих веществ. Сток талых вод вызывает резкий рост мутности, цветности и показателей органического загрязнения вследствие смыва с водосбора накопленных за зиму веществ антропогенного характера. Уровень воды в р. Вычегде за два года исследований существенно не различался (рис. 1б).

Общие физико-химические показатели: динамика и факторы влияния. Для периода весеннего половодья (рис. 1б) на станциях

исследования отмечено незначительное подкисление воды (рН 6,50–6,95), связанное с поступлением кислых талых вод (рис. 2а). Летне-осенний период – второй пик изменения рН, связанный с дождевыми паводками. В начальную и среднюю фазу осени часто наблюдается сдвиг в слабощелочную область до $\text{pH} > 7,5$. Несмотря на сезонные колебания, в целом за 2022–2023 гг. значения водородного показателя на обеих мониторинговых станциях оставались в пределах, характерных для природных вод, варьируя от 6,8 до 7,7, что указывает на буферную ёмкость водной системы.

Результаты исследований 2022–2023 гг. подтверждают установленную ранее тенденцию: вода р. Вычегды в районе г. Сыктывкара характеризуется низкой общей минерализацией, типичной для рек лесной зоны с преобладающим снеговым питанием и малой долей подземного стока [3, 5]. Наблюдается чётко выраженная сезонная динамика минерализации (рис. 2б), напрямую связанная с гидрологическим режимом – максимальные значения 130–160 мг/дм³ отмечаются в период ледостава (зимняя межень). Это объясняется доминирующей ролью более минерализованных подземных вод, доля которых в общем стоке возрастает, а также процессами концентрирования солей подо льдом при ограниченном водообмене. В период весеннего половодья минерализация падает до минимальных значений 64–85 мг/дм³, вследствие разбавления основного объёма речной воды маломинерализованными талыми и поверхностными водами. Ионный состав в течение всего периода оставался устойчивым и соответствовал гидрокарбонатному классу кальциевой группы по классификации О.А. Алекина [12].

Гидрокарбонаты (HCO_3^-) составляли свыше 50 % от суммы всех ионов, а их среднегодовая концентрация демонстрировала незначительный рост со 100–110 мг/дм³ в 2022 г. до 110–115 мг/дм³ в 2023 г., что может быть связано с вариациями интенсивности биохимических процессов и выщелачивания пород водосбора. Содержание хлорид- и сульфат-ионов оставалось низким (Cl^- 0,7–12,5 мг/дм³; $\text{SO}_4^{2-} < 30$ мг/дм³), достигая минимума в половодье. Это указывает на ограниченное влияние антропогенных источников (коммунально-бытовых и промышленных стоков), для которых характерно повышенное содержание данных ионов, и подтверждает естественное, геохимическое происхождение основного солевого состава. Общая жёсткость воды (рис. 2в) на обоих водозаборах была низкой (средне-

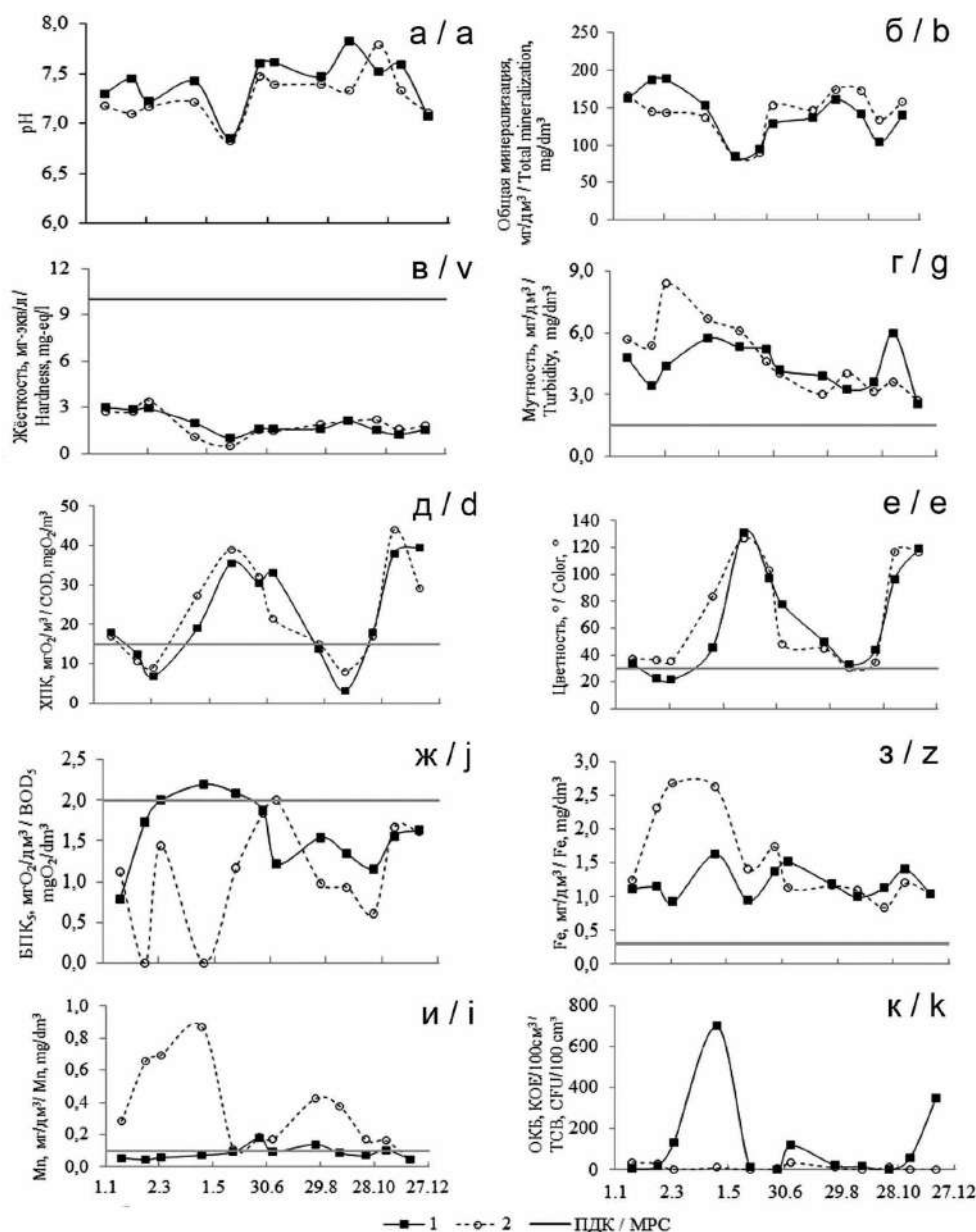


Рис. 2. Среднемесячные (за 2022–2023 гг.) показатели природной воды р. Вычегды на станциях исследования. а–к – исследованные показатели.

По оси абсцисс – даты отбора проб. Условные обозначения:

1 – станция 1, 2 – станция 2, ПДК – предельно допустимая концентрация

Fig. 2. Average monthly parameters (for 2022–2023) of the Vychegda River natural water at the monitoring stations. а–к – studied indicators. The abscissa axis shows the sampling dates.

Legend: 1 – station 1, 2 – station 2, MPC – maximum permissible concentration

годовая 1,8–2,1 мг-экв/дм³), что позволяет классифицировать воду как «мягкую». Весеннее снижение жёсткости до 0,5–0,9 мг-экв/дм³ является закономерным следствием разбавления и, возможно, некоторого перехода кальция в донные отложения. Годовой диапазон изменения концентрации кальция (Ca^{2+} 9,5–48,0 мг/дм³) в целом отражает при-

родную цикличность и не свидетельствует о критическом антропогенном воздействии на данный параметр. Как показали результаты, режим минерализации и ионный состав воды р. Вычегды в черте г. Сыктывкара на станциях исследования в 2022–2023 гг. зависели в первую очередь от природных гидрологических и геохимических факторов, а их сезонная

динамика носила ожидаемый и хорошо выраженный характер.

На станциях 1 и 2 пиковые значения мутности отмечали в периоды весеннего половодья и осенних дождевых паводков (рис. 2г), также в этот период на станциях отмечено увеличение показателей ХПК, цветности и БПК₅ (рис. 2 д, е, ж). Диапазон цветности в этот период на ст. 1 составляет 23–160°, на ст. 2 – 22–154°, колебания ХПК на ст. 1 – 8,6–58,0 и ст. 2 – 7,2–58,3 мгО₂/дм³. Значительные сезонные колебания цветности, мутности и ХПК, превышающие ПДК, особенно в паводковый период, типичны для рек таёжной зоны и связаны с поступлением аллохтонной органики и взвешенных веществ с водосбора, но также эти показатели могут указывать на антропогенное загрязнение [13]. Превышение ПДК содержания биогенных элементов и их соединений (NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, PO₄³⁻) за период наблюдений не выявлено.

Проведённые исследования также показали, что в поверхностных водах р. Вычегды отсутствуют хлорорганические пестициды – гексахлорциклогексан, гептахлор, дихлордифенилтрихлорэтан, дихлордифенилдихлорэтан, дихлордифенилдихлорэтилен, 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота и гексахлорбензол, а также такие распространённые органические загрязнители как ацетон, метанол, фенол, формальдегид. В незначительных количествах отмечено содержание иодидов 0,0012–0,018 мг/дм³ и фторидов 0,11–0,29 мг/дм³.

Отметим, что в период с апреля по июнь наблюдается рост содержания алюминия в воде станций исследования до 0,15 мг/дм³, что связано с увеличением поверхностного и внутрипочвенного стока с водосборной территории. Талые воды способствуют выносу из почв алюминия, связанного с гумусовыми веществами, органоминеральными коллоидами и тонкодисперсными минеральными

частицами. Одновременно поступление органических кислот и разбавление речной воды способствуют снижению pH и повышению подвижности алюминия [14].

Во всех образцах исследуемой речной воды значения массовой концентрации соединений тяжёлых металлов (Co, Cr, Cu, Ni, Cd, Hg, Mo) находятся ниже предела обнаружения анализа по каждой методике их определения. Необходимо отметить, что анализ пресных поверхностных вод на наличие тяжёлых металлов не всегда позволяет получить полную картину уровня их загрязнения, что связано со способностью металлов переходить из растворённого состояния во взвесь [15]. Проведённые исследования выявили невысокое содержание в воде Zn на станциях мониторинга (0,011–0,031 мг/дм³), а также зафиксировано наличие в воде Pb на ст. 1, его содержание не превышает 0,0004 мг/дм³ и общий As 0,0023 мг/дм³ соответственно. Среди литофильных металлов превышение нормативов ПДК установлено только для общего Fe и Mn (табл., рис. 2з, и). На станциях 1 и 2 отмечаются систематические превышения ПДК по Fe_{общ} (на ст. 1 до 1,6, на ст. 2 до 2,7 мг/дм³) и Mn (ст. 1 до 0,18, ст. 2 до 0,9 мг/дм³). Это может быть обусловлено как естественными геохимическими особенностями донных отложений на данном участке [4], так и возможным влиянием локальных источников загрязнения в черте города (ливневые стоки, грунтовые воды) [16].

Изучено микробиологическое состояние воды р. Вычегды на станциях исследования (рис. 2к). Для ст. 1 отмечено превышение допустимых уровней ОКБ, достигающих в период половодья до 700 КОЕ/100 см³ при нормативе «не допускается», что указывает на периодическое поступление в водоток органических и фекальных загрязнений. На ст. 2 микробиологические показатели стабильнее и ниже, ОКБ – до 62 КОЕ/100 см³, хотя также не соответствуют норме для воды без обработки.

Таблица / Table

Превышения ПДК по основным показателям загрязнения воды р. Вычегды и удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ) на станциях мониторинга за 2022–2023 гг.

Exceedances of MPC for key pollution indicators in the Vychegda River water and the value of the specific combinatorial index of water pollution (SCIWP) at monitoring stations for 2022–2023

Год Year	Станция Station	Количество проб с превышением ПДК Number of samples exceeding the MPC				УКИЗВ SCIWP
		Fe	Mn	ХПК / COD	БПК ₅ / BOD ₅	
2022	1	12	2	8	6	3,27
	2	12	10	8	2	3,31
2023	1	12	5	7	2	3,27
	2	12	11	7	2	3,29

Согласно расчёту УКИЗВ для исследованных станций по количеству случаев повторяемости и кратности превышения ПДК и обобщённым оценочным баллам по загрязняющим ингредиентам установлено, что критическими показателями загрязнённости воды в р. Вычегде в 2022–2023 гг. являются содержание $Fe_{\text{общ}}$, Mn и показатели ХПК и БПК₅ (табл.). По значениям УКИЗВ установлено, что вода р. Вычегды в черте г. Сыктывкара в местах водозаборов относится к 3 «б» классу («очень загрязнённая»).

Заключение

Проведённое исследование позволяет дать комплексную оценку качества воды р. Вычегды на участках водозаборов г. Сыктывкара и сформулировать следующие основные выводы.

1. Гидрохимический режим р. Вычегды формируется преимущественно под влиянием природных условий (умеренно-континентальный климат, весеннее половодье). Это обуславливает выраженную сезонную динамику с пиковыми значениями цветности, мутности и органических веществ (ХПК) на станциях исследования в период паводков, что связано с поступлением гуминовых соединений и взвешенных веществ с водосборной площади.

2. Несмотря на общий природный фон, выявленные пространственно-временные особенности свидетельствуют о наличии локальных антропогенных загрязнений, отражающихся на составе воды в местах водозаборов. К ним относятся: устойчивое превышение ПДК по общему железу (до 2,7 мг/дм³) и марганцу (до 0,9 мг/дм³) на всём исследуемом участке; периодические повышения показателя ОКБ до 700 КОЕ/100 см³, указывающие на микробиологическое и органическое загрязнение; пространственную неоднородность загрязнения, выражающихся в различиях между водозаборами.

3. Качество исходной воды на двух станциях имеет существенные различия, требующие индивидуального подхода к водоподготовке. Для водозабора № 1 («Красная Гора») критическими факторами являются повышенная мутность (особенно в паводковый период) и высокие концентрации марганца. Повышенная мутность обусловлена поступлением взвешенных частиц с поверхностным стоком и эрозией берегов, что характерно для природных процессов в период половодья. Высокие концентрации марганца, вероятно, связаны

с природными геохимическими особенностями водосбора (выщелачивание из почв и донных отложений, характерное для таёжных ландшафтов). Водозабор № 2 («Эжвинский район») отличается стабильно более высокими значениями БПК₅, что свидетельствует о более сильном органическом загрязнении, вероятно, антропогенного генезиса.

4. Комплексный анализ показал, что вода на обеих станциях не соответствует гигиеническим нормативам по железу (превышение ПДК в 9 раз), марганцу (превышение в 9 раз), цветности (превышение в 5,3 раза), БПК₅ (до 2–3 ПДК) и микробиологическим показателям. Вода относится к 3 классу («загрязнённая»). Установлена пространственная дифференциация: для водозабора № 1 («Красная Гора») критическими являются марганец и мутность, для водозабора № 2 («Эжвинский район») – органическое загрязнение (БПК₅). Это подтверждает необходимость дифференцированного подхода к мониторингу и водоподготовке на каждом из водозаборов.

Таким образом, обеспечение безопасности питьевого водоснабжения г. Сыктывкара должно базироваться на адаптивной системе управления, учитывающей как общие сезонные колебания природного фона, так и на выявлении локальных антропогенных нагрузок на каждом водозаборе.

Исследования выполнены при поддержке Федерального проекта «Чистая вода» в рамках национального проекта «Экология» в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 г.», а также при выполнении темы Госзадания ИБ Коми НЦ УрО РАН № 125021902460-2.

Литература

1. Веницианов Е.В., Аджиенко Г.В., Возняк А.А., Чиганова М.А. Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 47–59.
2. Фомина В.Ф. Состав водного гумуса реки Вычегды в створе водозабора г. Сыктывкара // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 8. С. 42–47.
3. Власова Т.А. Гидрохимия главных рек Коми АССР. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1988. 152 с.
4. Лапицкая В.Ф., Митюшева Т.П., Оберман Н.Г. Актуальные проблемы гидрогеологии республики Коми // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2004. № 6. С. 9–12.

5. Patova E.N., Kondratenok B.M., Sivkov M.D., Kostrova S.N. Water quality of the Vychegda River under conditions of the receipt of treated wastewater from the pulp and paper industry // *Contemp. Probl. Ecol.* 2021. V. 14. P. 588–605. doi: 10.1134/S1995425521060081

6. Елсаков В.В., Щанов В.М. Спутниковые методы в анализе изменений экосистем бассейна р. Вычегда // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 4. С. 135–145. doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-13-135-145

7. О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2023 году: гос. доклад. Сыктывкар: Минприроды Республики Коми, 2024. 162 с.

8. AllRivers.info – Уровень воды онлайн [Электронный ресурс] <https://allrivers.info/gauge/vyichегда-syktvykar> (Дата обращения: 16.04.2026).

9. Rp5.ru – Архив погоды [Электронный ресурс] https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Сыктывкаре (Дата обращения: 16.04.2026).

10. Атлас по климату и гидрологии Республики Коми / под ред. А.И. Таскаева. М.: Дрофа, ДиК, 1997. 116 с.

11. Мискевич И.В., Самохина Л.А. О некоторых особенностях сезонной динамики гидробиологических процессов на равнинных водотоках на примере реки Вычегды // *Вестник современных исследований*. 2019. № 3.11 (30). С. 124–129.

12. Алекин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1953. 296 с.

13. Янин Е.П., Кузьмич В.Н., Иванецкий О.М. Региональная природная неоднородность химического состава поверхностных вод суши и необходимость её учета при оценках их экологического состояния и интенсивности техногенного загрязнения // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2016. № 6. С. 3–72.

14. Pourpoint F., Templier J., Anquetil C., Vezin H., Trébosch J., Trivelli X., Chabaux F., Pokrovsky O.S., Prokushkin A.S., Amoureux J.-P., Lafon O., Derenne S. Probing the aluminum complexation by Siberian riverine organic matter using solid-state DNP-NMR // *Chem. Geol.* 2017. V. 452. P. 1–8. doi: 10.1016/j.chemgeo.2017.02.004

15. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 268 с.

16. Антонова Е.А. Техногенные источники поступления железа и марганца в воды бассейна р. Камы // *Географический вестник*. 2011. № 2. С. 26–31.

References

1. Venitsianov E.V., Adzhienko G.V., Voznyak A.A., Chiganova M.A. Contemporary problems of the surface waters quality assessment, regulation and monitoring // *Water sector of Russia: problems, technologies, management*. 2018. No. 1. P. 47–59 (in Russian).

2. Fomina V.F. Water humus composition of the Vychegda River at water intake site of the city of Syktывkar // *Water supply and sanitary technique*. 2011. No. 8. P. 42–47 (in Russian).

3. Vlasova T.A. Hydrochemistry of the main rivers of the Komi ASSR. Syktывkar: FRC Komi SC UB RAS Publ., 1988. 152 p. (in Russian).

4. Lapitskaya V.F., Mityusheva T.P., Oberman N.G. Actual problems of hydrogeology of the Komi Republic // *Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2004. No. 6. P. 9–12 (in Russian).

5. Patova E.N., Kondratenok B.M., Sivkov M.D., Kostrova S.N. Water quality of the Vychegda River under conditions of the receipt of treated wastewater from the pulp and paper industry // *Contemp. Probl. Ecol.* 2021. V. 14. P. 588–605. doi: 10.1134/S1995425521060081

6. Elsakov V.V., Shchanov V.M. Satellite data in analysis of changes in ecosystems of the Vychegda River basin // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. V. 13. No. 4. P. 135–145 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-13-135-145

7. On the state of the environment of the Komi Republic in 2023: state report. Syktывkar: Ministry of Natural Resources of the Komi Republic, 2024. 162 p. (in Russian).

8. AllRivers.info – Water level online [Internet resource] <https://allrivers.info/gauge/vyichегда-syktvykar> (Accessed: 16.04.2026).

9. Rp5.ru – Weather archive [Internet resource] https://rp5.ru/Weather_archive_in_Syktывkar (Accessed: 16.04.2026).

10. Atlas of climate and hydrology of the Komi Republic / Ed. A.I. Taskaev. Moskva: Drofa, DiK, 1997. 116 p. (in Russian).

11. Miskevich I.V., Samokhina L.A. On some features of the seasonal dynamics of hydrobiological processes on lowland watercourses: case-study the Vychegda River // *Vestnik sovremennykh issledovaniy*. 2019. No. 3.11 (30). P. 124–129 (in Russian).

12. Alekin O.A. Fundamentals of Hydrochemistry. Leningrad: Hydrometeorological Publishing House, 1953. 296 p. (in Russian).

13. Yanin E.P., Kuzmich V.N., Ivanitsky O.M. Regional natural heterogeneity of the chemical composition of surface waters and the need to take it into account when assessing their ecological state and the intensity of technogenic pollution // *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnnykh resursov*. 2016. No. 6. P. 3–72 (in Russian).

14. Pourpoint F., Templier J., Anquetil C., Vezin H., Trébosch J., Trivelli X., Chabaux F., Pokrovsky O.S., Prokushkin A.S., Amoureux J.-P., Lafon O., Derenne S. Probing the aluminum complexation by Siberian riverine organic matter using solid-state DNP-NMR // *Chem. Geol.* 2017. V. 452. P. 1–8. doi: 10.1016/j.chemgeo.2017.02.004

15. Linnik P.N., Nabivanets B.I. Forms of metal migration in fresh surface waters. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 268 p. (in Russian).

16. Antonova E.A. Technogenic sources of iron and manganese to the water of the Kama River basin // *Geographical Bulletin*. 2011. No. 2. P. 26–31 (in Russian).

Адсорбция резорцина сорбентами на основе сапропеля

© 2026. И. В. Зыкова¹, д. х. н., профессор, В. А. Исаков², к. х. н., доцент,
Н. М. Мишина¹, ассистент, Я. Н. Мануриков², ассистент,

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна,
191186, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18,

²Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,
173003, Россия, г. Великий Новгород, ул. Большая Санкт-Петербургская, д. 41,
e-mail: zykova-irina@yandex.ru

Комплексная очистка сточных вод от различных по природе загрязнителей является актуальной проблемой, и разработка новых сорбентов имеет большое научное и практическое значение. На основе сапропеля получены сорбенты: термоокисленный сапропель, гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля, модифицированный гуминовыми кислотами термоокисленный сапропель, органоминеральный композиционный материал на основе термоокисленного сапропеля и бентонита. Адсорбцию резорцина из модельных растворов с концентрациями от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³ сорбентами на основе сапропеля проводили в статических условиях при соотношении 1 г сорбента на 200 см³ раствора. Установлено, что лимитирующей стадией адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля является смешанная диффузия. Для описания адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля применимы теории адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) и Дубинина–Радушкевича. Учитывая значения энергии активации и термодинамические параметры адсорбции резорцина полученными сорбентами на основе сапропеля механизмом адсорбции резорцина можно считать полимолекулярную адсорбцию на поверхности и физическую адсорбцию за счёт объёмного заполнения микро- и мезопор, а также полостей. Резорцин также может образовывать с сорбентами на основе сапропеля ковалентные и водородные связи с силикатными и алюмосиликатными группами, водородные связи с аминогруппами. Поэтому разделить вклад физической адсорбции и возможных химических взаимодействий функциональных групп сорбентов на основе сапропеля с резорцином достаточно сложно. Предельные величины адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ (0,25–1,00 ммоль/г) и уравнению Дубинина–Радушкевича (0,52–2,60 ммоль/г), сопоставимы с другими разработанными сорбентами.

Ключевые слова: адсорбция, термоокисленный сапропель, гуминовые кислоты, бентонитовая глина, модифицированный сорбент, резорцин.

Resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents

© 2026. I. V. Zyкова¹ ORCID: 0000-0002-1914-7761, V. A. Isakov² ORCID: 0000-0001-5669-7079,
N. M. Mishina¹ ORCID: 0009-0005-2144-5150, Ya. N. Manurikov² ORCID: 0009-0003-8781-8808

¹Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
18, Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, Russia, 191186,

²Yaroslav-the-Wise Novgorod State University,
44, Bolshaya Sankt-Peterburgskaya St., Velikiy Novgorod, Russia, 173003,
e-mail: zykova-irina@yandex.ru

Comprehensive wastewater treatment from various pollutants is an urgent problem, and the development of new sorbents is of great scientific and practical importance. Sorbents based on sapropel were obtained: thermally oxidized sapropel, humic acids isolated from sapropel, thermally oxidized sapropel modified with humic acids, organomineral composite material based on thermally oxidized sapropel and bentonite. Resorcinol adsorption from model solutions with concentrations from $1 \cdot 10^{-5}$ to $1 \cdot 10^{-2}$ mol/dm³ on sapropel-based sorbents was carried out under static conditions at a ratio of 1 g of sorbent per 200 cm³ of solution. It is shown that the limiting stage of resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents is mixed diffusion. The adsorption theories of Langmuir, Freundlich, Brunauer–Emmett–Teller (BET) and Dubinin–Radzadkevich are applicable to describe the resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents. Taking into account the values of the activation energy and thermodynamic parameters of resorcinol adsorption, the obtained sapropel-based sorbents can be considered as the mechanism of resorcinol adsorption on the surface and physical adsorption due to volumetric filling of micro- and mesopores, as well as cavities. Resorcinol can also form covalent and hydrogen bonds

with silicate and aluminosilicate groups, and hydrogen bonds with amino groups with sapropel-based sorbents. Therefore, it is quite difficult to separate the contribution of physical adsorption and possible chemical interactions of functional groups of sapropel-based sorbents with resorcinol. Limiting values of resorcinol adsorption on sapropel-based sorbents calculated by the BET equation (0.25–1.00 mmol/g) and the Dubinin–Radushkevich equation (0.52–2.60 mmol/g), comparable to other developed sorbents.

Keywords: adsorption, thermally oxidized sapropel, humic acids, bentonite clay, modified sorbent, resorcinol.

Для очистки промышленных сточных вод разработано много методов и технологий, позволяющих снижать антропогенную нагрузку на водные объекты. Заключительным этапом в технологических процессах, как правило, является доочистка стоков с применением сорбционных материалов. В подавляющем большинстве случаев существующие на рынке природные монокомпонентные сорбенты характеризуются селективными сорбционными свойствами в отношении определённого класса загрязнителей. Научноёмкие разработки сорбционных материалов, которые позволяют комплексно сорбировать загрязнители различной химической природы вплоть до полного их поглощения, имеют очень высокую стоимость. Относительно недорогие сорбенты, способные очищать воду от различных по природе загрязнителей, практически отсутствуют. Поэтому комплексная очистка сточных вод от различных по природе загрязнителей является актуальной проблемой, и разработка новых сорбентов имеет большое научное и практическое значение.

Сапропели – возобновляемое природное органическое сырьё. На территории России сапропель встречается практически повсеместно, суммарные запасы составляют около 300 млрд м³. Только в Ленинградской и Новгородской областях ежегодно образуется до 1 млн м³ сапропеля. В настоящее время сапропель не находит квалифицированного применения. Возрастание объёмов сапропеля приводит к заболачиванию озёр.

Сапропель, обладая уникальным органоминеральным составом, может служить сырьём для получения дешёвых и эффективных углеродминеральных сорбентов, включая композиционные сорбенты на его основе, для очистки сточных вод от различных по природе загрязнителей [1, 2].

Фенол и его производные, попадающие в сточные воды различных производств (химической, деревоперерабатывающей и других отраслей), оказывают токсическое влияние на живые организмы, содержание биогенных элементов и растворённых газов в водоёмах [3, 4].

Для очистки сточных вод от фенола и его

производных наиболее широко применяют сорбционные методы [5–8]. В настоящее время разработаны синтетические сорбенты (магнийсодержащий сорбент, криогель-сорбент, продукт пиролиза автомобильных шин и др.) и природные (монтмориллонитовая и бентонитовая глины, древесные опилки и др.), а также сорбенты на основе отходов сельскохозяйственных производств (лузга гречихи, подсолнечника, риса и др.) [9–12]. Однако, несмотря на большое количество разработанных сорбентов, механизмы взаимодействия фенолов с ними, а также термодинамика и кинетика процесса теоретически до конца не проработаны. Кроме того, существуют большие трудности с получением предложенных сорбентов в промышленных масштабах.

Целью исследования явилось изучение адсорбционных свойств сорбентов на основе сапропеля по отношению к органическим загрязнителям на примере резорцина.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта для получения сорбентов использовали сапропель озера Липово Новгородской области с массовой долей органических веществ 69–70 %. Сапропель высушивали до воздушно-сухого состояния при температуре 105 °С. Исходный сапропель содержит значительные количества водорастворимых веществ. При контакте его с водой при разных значениях pH могут вымываться гумусовые и легкогидролизуемые вещества, что ухудшает качество очистки воды вследствие вторичного загрязнения. Поэтому более эффективно использовать в качестве сорбента термоокисленный сапропель, что исключает вторичное загрязнение воды вымываемыми из сорбента веществами [13].

На основе сапропеля получили сорбенты [14]:

1. Термоокисленный при 600 °С сапропель (ТС/TS). В результате термоокисления происходит выделение летучих продуктов, за счёт чего формируется пористая структура сорбента, а также изменяются состав и свойства поверхности. Термоокисление способствует

увеличению удельной поверхности, пористости и количества функциональных групп на поверхности сорбента.

2. Гуминовые кислоты (ГК/НА), выделенные из сапропеля. Гуминовые кислоты обладают развитой удельной поверхностью, содержат большое количество функциональных групп (карбоксильных, гидроксильных, лактонных и аминных) и гидрофобных участков на поверхности, способных связывать органические и неорганические загрязнители.

3. Модифицированный гуминовыми кислотами термоокисленный сапропель (МТСГК/МТSHA). Модификацию гуминовыми кислотами проводили с целью увеличения количества функциональных групп и гидрофобных участков на поверхности термоокисленного сапропеля.

4. Органоминеральный композиционный материал (ОМКМ/ОМСМ) на основе термоокисленного сапропеля и бентонита. Введение бентонита в структуру сорбента способствует увеличению минеральной части и появлению на поверхности сорбента дополнительных силикатных и алюмосиликатных функциональных групп.

В качестве загрязнителя использовали резорцин, относящийся к четвертому классу опасности. Фенолы, в том числе резорцин, являются одними из распространенных и приоритетных загрязнителей сточных вод химических и деревоперерабатывающих производств. При превышении нормативов фенолы оказывают токсичное действие на гидробионты и экосистемы за счёт нарушения естественного круговорота органических веществ в водоёмах [15].

Изучение адсорбции резорцина из модельных водных растворов (концентрации 0,01–10,00 ммоль/дм³) полученными сорбентами проводили при температурах 20 и 40 °С в статических условиях при соотношении 1 г сорбента на 200 см³ раствора. Для приготовления модельных растворов загрязнителей использовали сверхчистую воду (система очистки воды Best-S15 UV). Диапазон выбранных концентраций резорцина превышает ПДК для питьевой воды в 10 и более раз.

Концентрацию резорцина в модельных растворах определяли флуориметрическим методом с использованием анализатора жидкости Флюорат-02-2М (Люмэкс, Россия).

Эксперименты проводили в пятикратной повторности, статистическую обработку результатов проводили с использованием

программного обеспечения Microsoft Office Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Кинетические кривые адсорбции резорцина из модельных растворов с концентрацией 0,1 ммоль/дм³ полученными сорбентами представлены на рисунке 1.

Для изучения механизма адсорбции и определения лимитирующих стадий кинетические кривые адсорбции резорцина из модельных растворов полученными сорбентами были проанализированы с использованием четырёх основных кинетических моделей: Лагергрена (псевдопервого порядка), Хо и Маккея (псевдовторого порядка), Морриса–Вебера и Бойда. Адсорбция резорцина в линейных координатах указанных кинетических моделей представлена на примере модифицированного гуминовыми кислотами термоокисленного сапропеля (рис. 2) [15].

Прямолинейная зависимость кривых адсорбции резорцина полученными сорбентами согласно кинетической модели Бойда (рис. 2а) позволяет говорить о том, что межфазный перенос лимитируется внутренней диффузией, однако, наличие излома на кривых адсорбции резорцина полученными сорбентами согласно кинетической модели Морриса–Вебера (рис. 2б) указывает на смешанно-диффузионный характер адсорбции.

Установлено, что зависимость величины адсорбции резорцина полученными сорбентами от времени контакта удовлетворительно описывается кинетическими моделями как Лагергрена (рис. 2в), так и Хо и Маккея (рис. 2г). Кинетические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами по моделям Лагергрена и Хо и Маккея представлены в таблице 1.

Изотермы адсорбции резорцина на полученных сорбентах представлены на рисунке 3.

Для описания процесса адсорбции резорцина на полученных сорбентах использовали уравнения теорий адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) и Дубинина–Радускевича. Изотермы адсорбции резорцина в линейных координатах указанных уравнений представлены на примере модифицированного гуминовыми кислотами термоокисленного сапропеля (рис. 4).

Для описания адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля применимы теории адсорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, БЭТ и Дубинина–Радускевича. Термоди-

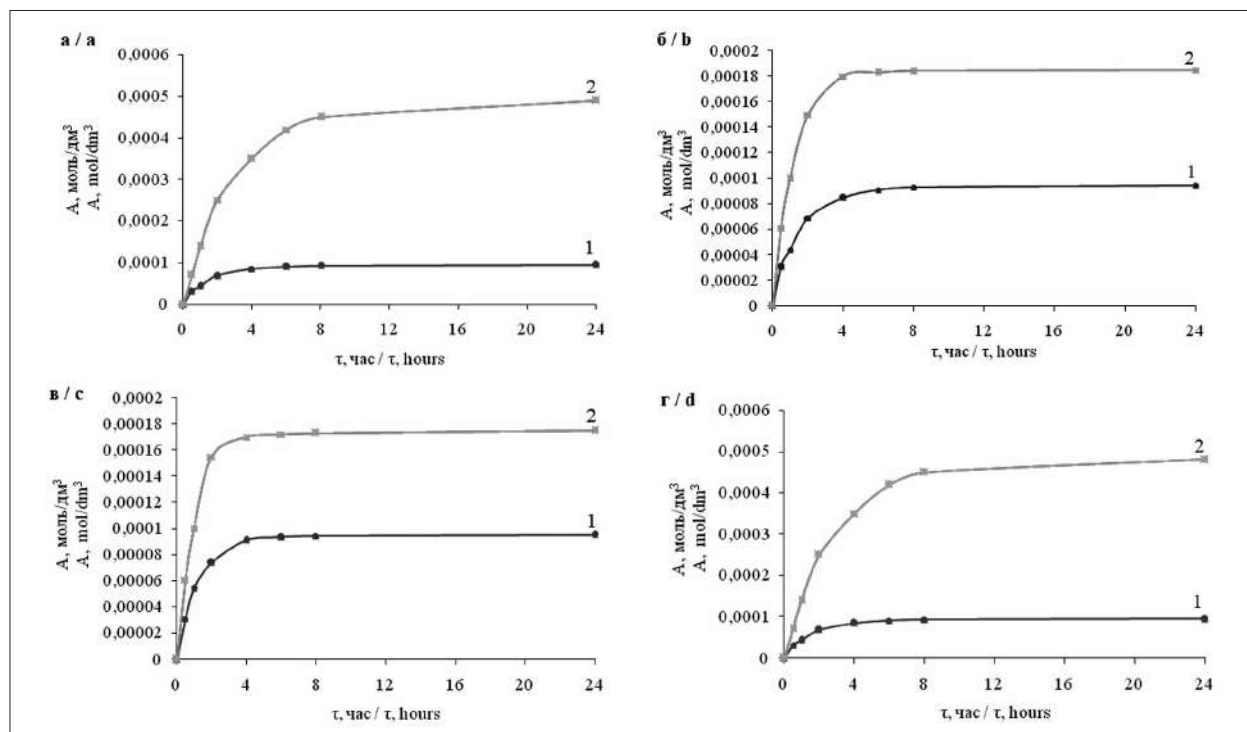


Рис. 1. Изменения адсорбции резорцина на ТС (а), ГК (б), МТСГК (в), ОМКМ (г) во времени при температурах 20 °С (1) и 40 °С (2). Здесь и далее на рисунках и в таблицах: ТС – термоокисленный сапропель; ГК – гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля; МТСГК – модифицированный гуминовыми кислотами ТС; ОМКМ – органоминеральный композиционный материал на основе ТС и бентонита / **Fig. 1.** Changes in resorcinol adsorption on TS (a), HA (b), MTSHA (c), OMCM (d) over time at temperatures of 20 °C (1) and 40 °C (2). Here and further in the figures and tables: TS – thermally oxidized sapropel; HA – humic acids isolated from sapropel; MTSHA – TS modified with humic acids; OMCM – organomineral composite based on TS and bentonite

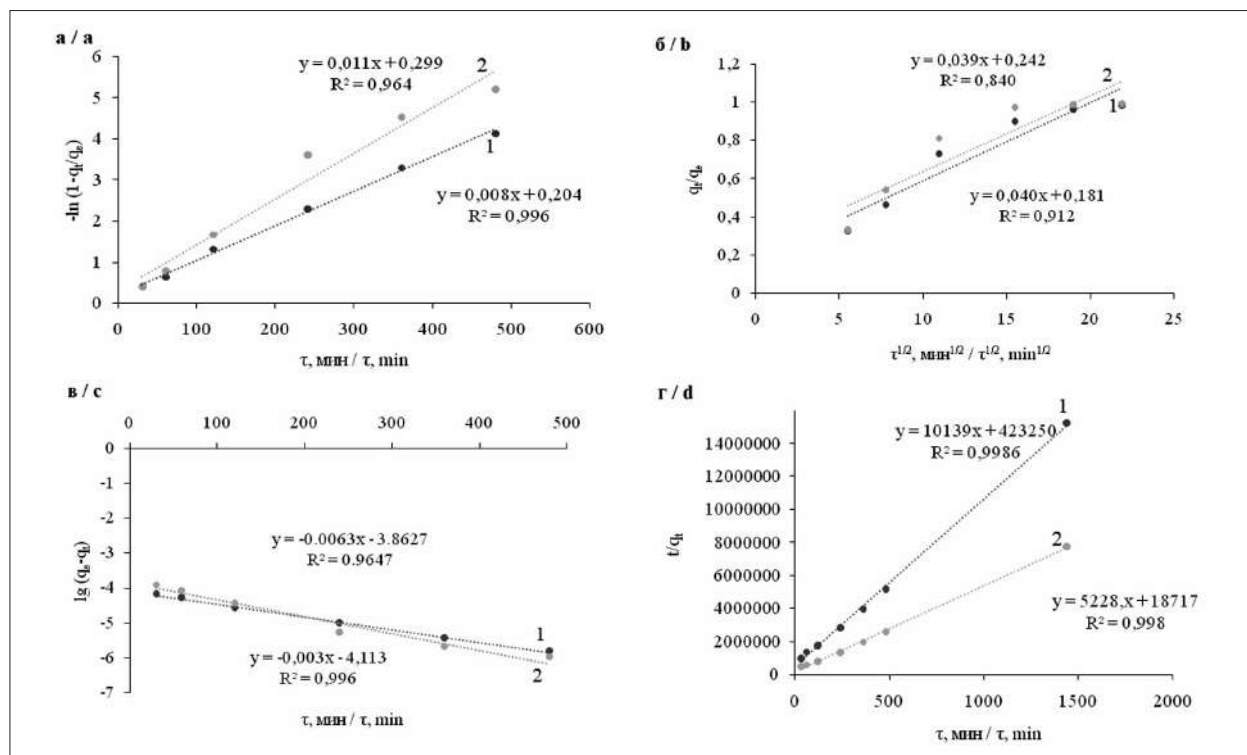


Рис. 2. Адсорбция резорцина на МТСГК при температурах 20 °С (1) и 40 °С (2) во времени в линейных координатах кинетических моделей Бойда (а), Морриса–Вебера (б), Лагергрена (в), Хо и Маккея (г) / **Fig. 2.** Resorcinol adsorption on MTSHA at 20 °C (1) and 40 °C (2) in time in linear coordinates of Boyd (a), Morris–Weber (b), Lagergren (c), Ho and McKay (d) kinetic models

Таблица 1 / Table 1
Кинетические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами / Kinetic values of resorcinol adsorption by the obtained sorbents

Кинетическая модель Kinetic model	Кинетическая величина Kinetic value	Сорбенты / Sorbents			
		ТС / TS	ГР / HA	МТСГР / MTSNA	ОМГМ / OMCM
Лажергрена Lagergren	Энергия активации, кДж · моль ⁻¹ Activation energy, kJ · mol ⁻¹	14,9 ± 0,7	27,9 ± 0,9	20,3 ± 0,8	15,0 ± 0,7
	Константа скорости при 20 °С, мин ⁻¹ Velocity constant at 20 °C, min ⁻¹	(5,3 ± 0,2) · 10 ⁻³	(8,5 ± 0,3) · 10 ⁻³	(8,5 ± 0,3) · 10 ⁻⁵	(5,8 ± 0,2) · 10 ⁻⁵
	Константа скорости при 40 °С, мин ⁻¹ Velocity constant at 20 °C, min ⁻¹	(7,8 ± 0,3) · 10 ⁻³	(17,7 ± 0,6) · 10 ⁻⁵	(14,5 ± 0,4) · 10 ⁻⁵	(8,5 ± 0,3) · 10 ⁻⁵
Хо и Маккея Ho and McKay	Энергия активации, кДж · моль ⁻¹ Activation energy, kJ · mol ⁻¹	14,5 ± 0,6	28,4 ± 1,0	20,9 ± 0,8	15,7 ± 0,7
	Константа скорости при 20 °С, г · ммоль ⁻¹ · мин ⁻¹ / Velocity constant at 20 °C, g · mmol ⁻¹ · min ⁻¹	(5,4 ± 0,2) · 10 ⁻⁵	(5,5 ± 0,2) · 10 ⁻⁵	(6,6 ± 0,2) · 10 ⁻⁵	(5,4 ± 0,2) · 10 ⁻⁵
	Константа скорости при 40 °С, г · ммоль ⁻¹ · мин ⁻¹ Velocity constant at 20 °C, g · mmol ⁻¹ · min ⁻¹	(7,9 ± 0,3) · 10 ⁻⁵	(12,0 ± 0,4) · 10 ⁻⁵	(11,5 ± 0,3) · 10 ⁻⁵	(8,2 ± 0,3) · 10 ⁻⁵

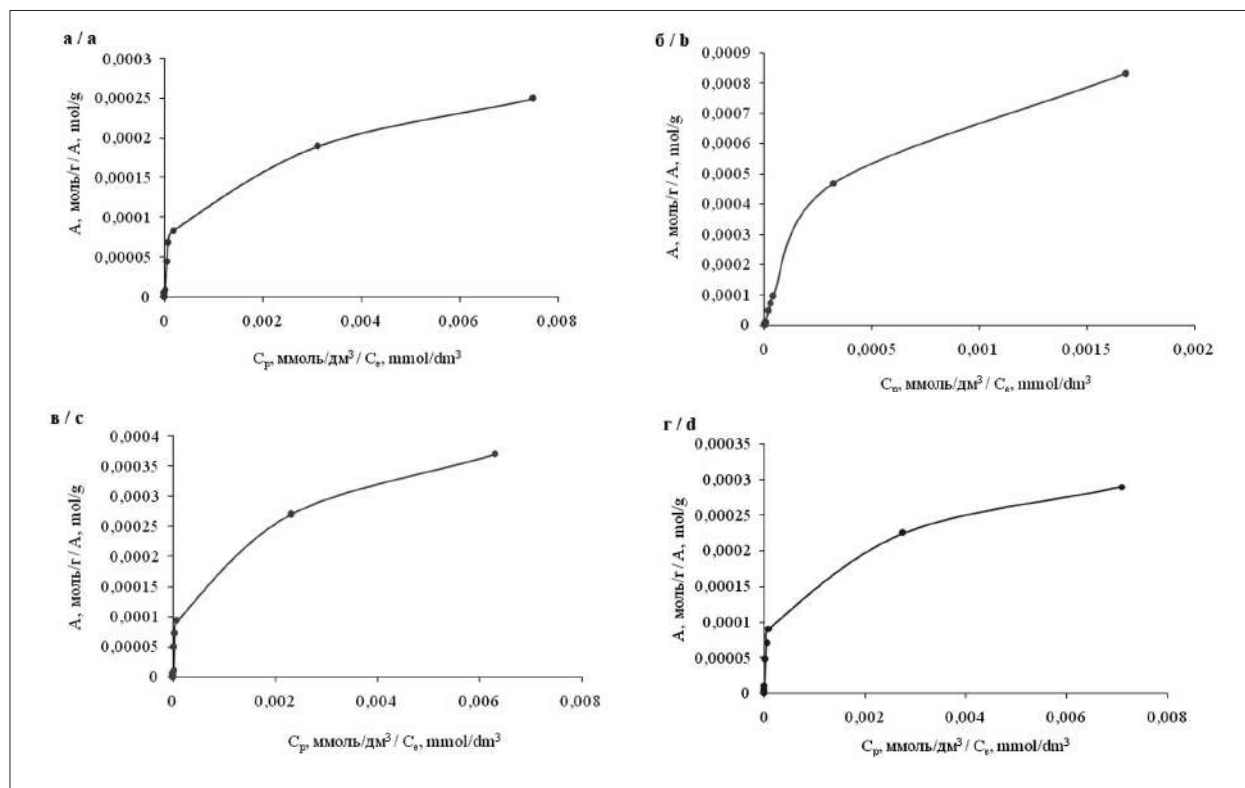


Рис. 3. Изотермы адсорбции резорцина на полученных сорбентах:
а – ТС, б – ГР, в – МТСГК, г – ОМКМ

Fig. 3. Isotherms of resorcinol adsorption on the obtained sorbents:
a – TS, b – HA, c – MTSHA, d – OMCM

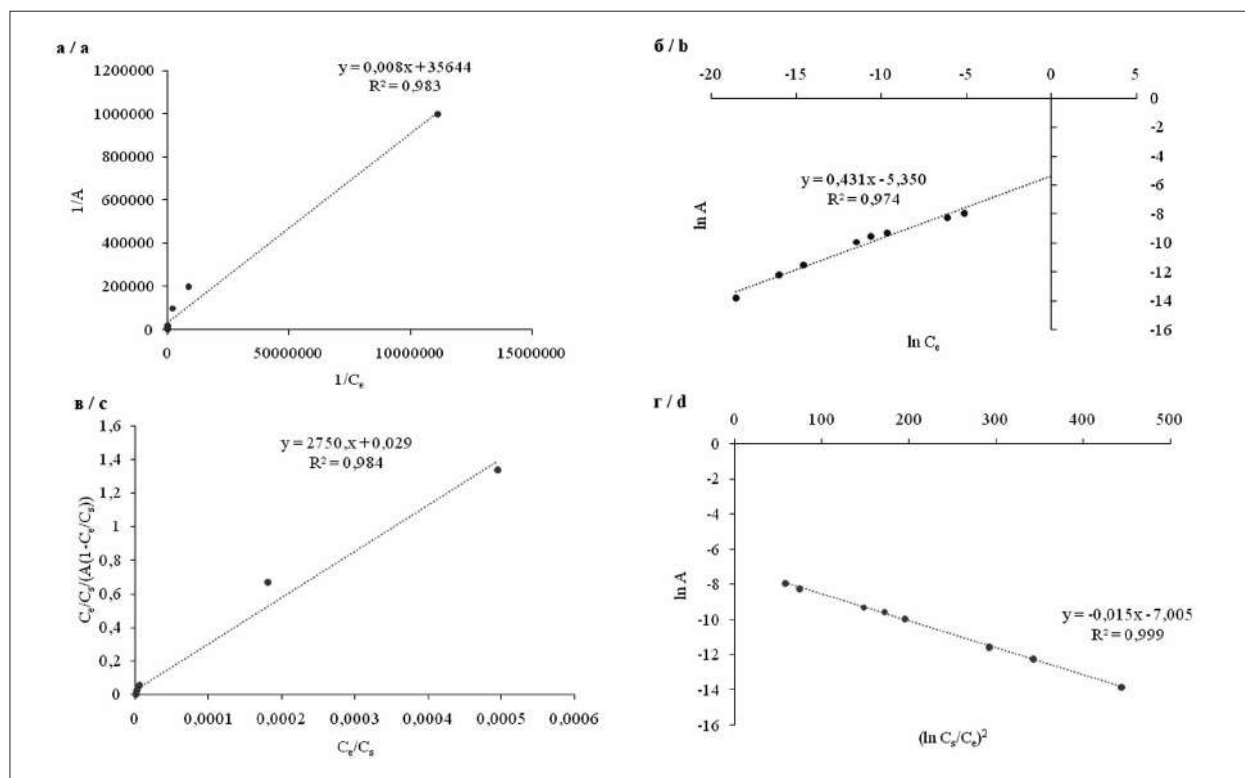


Рис. 4. Изотерма адсорбции резорцина на МТСГК в линейных координатах уравнений Ленгмюра (а), Фрейндлиха (б), Брунауэра–Эммета–Теллера (в), Дубинина–Радужкевича (г)

Fig. 4. Isotherm of resorcinol adsorption on MTSHA in linear coordinates of Langmuir (a), Freundlich (b), Brunauer–Emmett–Teller (c), Dubinin–Radushkevich (d) equations

Таблица 2 / Table 2

Термодинамические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами
Thermodynamic values of resorcinol adsorption by the obtained sorbents

Теория адсорбции Adsorption theory	Термодинамическая величина Thermodynamic value	Сорбенты / Sorbents			
		ТС TS	ГК HA	МТСГК MTSHA	ОМКМ ОМСМ
Ленгмюра Langmuir	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	0,0217±0,0009	0,106±0,004	0,0287±0,0013	0,0272±0,0012
	Константа адсорбционного равновесия / Adsorption equilibrium constant	4397904±205895	29999±1400	4050454±198520	3434019±161700
	Коэффициент аппроксимации / Approximation ratio	0,9693±0,0385	0,9953±0,0397	0,9834±0,0391	0,9826±0,0387
Фрейндлиха Freundlich	Константа Фрейндлиха (K) The Freundlich constant (K)	0,00259±0,00011	0,27673 ±0,01284	0,00475±0,00021	0,00334±0,00015
	Эмпирический показатель, отражающий гетерогенность поверхности (n) / An empirical indicator reflecting the heterogeneity of the surface (n)	2,39±0,10	1,22±0,05	2,32±0,08	2,40±0,11
	Коэффициент аппроксимации Approximation ratio	0,9854±0,0452	0,9787±0,0439	0,9744±0,0411	0,9744±0,0412
БЭТ Brunauer– Emmett–Teller	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	0,246±0,011	1,014±0,041	0,364±0,015	0,286±0,012
	Константа адсорбционного равновесия / Adsorption equilibrium constant	64743±3217	34614±1630	94203±4503	92054±4392
	Коэффициент аппроксимации Approximation ratio	0,9859±0,0432	0,9984±0,0457	0,9847±0,0422	0,9896±0,0433
Дубинина– Радушкевича Dubinin– Radushkevich	Предельная величина адсорбции, ммоль/г Adsorption maximum value, mmol/g	0,527±0,023	2,603±0,127	0,907±0,043	0,694±0,033
	Характеристическая энергия адсорбции, кДж Characteristic adsorption energy, kJ	20,297±0,932	14,052±0,522	20,030±0,897	20,297±0,922
	Коэффициент аппроксимации Approximation ratio	0,9935±0,0453	0,9949±0,0455	0,9992±0,0462	0,9993±0,0467

Таблица 3 / Table 3

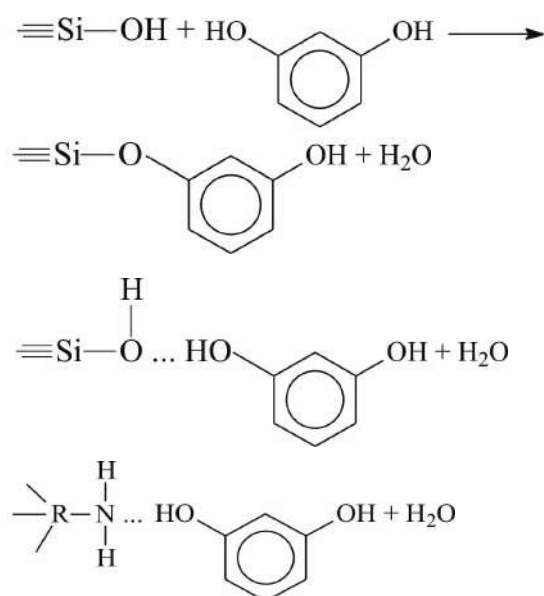
Текстульные характеристики сорбентов на основе сапропеля
Textural characteristics of sorbents based on sapropel

Текстульные характеристики Textural characteristics	Сорбенты / Sorbents			
	ТС TS	ГК HA	МТСГК MTSHA	ОМКМ OMCM
Удельная поверхность адсорбента, м ² /г Adsorbent specific surface area, m ² /g	82,5 ± 3,9	407,6 ± 20,2	142,0 ± 6,9	108,7 ± 5,3
Объём микропор адсорбента, см ³ /г Adsorbent micropores volume, cm ³ /g	0,061 ± 0,002	0,293 ± 0,011	0,105 ± 0,004	0,080 ± 0,003
Объём мезопор адсорбента, см ³ /г Adsorbent mesopores volume, cm ³ /g	0,032 ± 0,001	0,112 ± 0,004	0,045 ± 0,002	0,032 ± 0,001

намические величины адсорбции резорцина полученными сорбентами представлены в таблице 2.

Текстульные характеристики сорбентов на основе сапропеля, рассчитанные на основе теорий адсорбции БЭТ и Дубинина-Радushкевича, представлены в таблице 3.

Учитывая значения энергии активации и термодинамические параметры адсорбции резорцина полученными сорбентами на основе сапропеля механизмом адсорбции резорцина можно считать полимолекулярную адсорбцию на поверхности и физическую адсорбцию за счёт объёмного заполнения микро- и мезопор, а также полостей. Резорцин также может образовывать с функциональными группами сорбентов на основе сапропеля ковалентные и водородные связи с силикатными и алюмосиликатными группами, водородные связи с аминогруппами:



Поэтому, разделить вклад физической адсорбции и возможных химических взаимодействий функциональных групп сорбентов

на основе сапропеля с резорцином достаточно сложно.

Высокое значение предельной величины адсорбции резорцина гуминовыми кислотами, выделенными из сапропеля, можно связать с высоким содержанием аминных групп и развитой удельной поверхностью сорбента. Предельные величины адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ (0,25–1,00 ммоль/г) и уравнению Дубинина-Радushкевича (0,52–2,60 ммоль/г), сопоставимы со значениями предельных величин адсорбции резорцина модифицированными сорбентами (магнитные сорбенты на основе частиц Fe₃O₄, модифицированных гуминовыми кислотами – 0,27–0,61 ммоль/г, углеродными сорбентами ТС-1, АГ-3 – 1,15–3,00 ммоль/г, минеральными сорбентами – 0,55–1,05 ммоль/г).

Проведённое ранее исследование по адсорбции ионов меди(II) сорбентами на основе сапропеля показало следующие результаты: предельные величины адсорбции ионов меди(II) (0,56–1,40 ммоль/г) сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ, сопоставимы со значениями предельных величин адсорбции ионов меди(II) модифицированными сорбентами (углеродные нанотрубки – 0,6 ммоль/г, углеродные сорбент АД-05-2 – 0,8 ммоль/г, модифицированный кремнезём – 1,2 ммоль/г) [14].

Отработанные сорбенты на основе сапропеля можно использовать в производстве строительных материалов (тротуарной плитки, бордюрного камня, стеновых блоков и других строительных изделий).

Заключение

Комплексная очистка сточных вод от различных по природе загрязнителей является актуальной проблемой, и разработка новых

сорбентов имеет большое научное и практическое значение.

Сапропели – возобновляемое природное органическое сырьё. На территории России сапропель встречается практически повсеместно. Возрастание объёмов сапропеля приводит к заболачиванию озёр.

Сапропель, обладая уникальным органоминеральным составом, может служить сырьём для получения дешёвых и эффективных углеродминеральных сорбентов для очистки сточных вод от различных по природе загрязнителей.

На основе сапропеля получены сорбенты: термоокисленный сапропель, гуминовые кислоты, выделенные из сапропеля, модифицированный гуминовыми кислотами термоокисленный сапропель, органоминеральный композиционный материал на основе термоокисленного сапропеля и бентонита.

Установлено, что лимитирующей стадией адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля является смешанная диффузия.

Адсорбция резорцина в изученном диапазоне концентраций сорбентами на основе сапропеля удовлетворительно описывается кинетическими моделями Лагергрена и Хо и Маккея. Значения энергии активации адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля (14–28 кДж/моль), рассчитанные по указанным кинетическим моделям, а также термодинамические параметры адсорбции не позволяют разделить вклад физической адсорбции и возможных химических взаимодействий. Механизмом адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля можно считать:

- полимолекулярную адсорбцию на поверхности сорбентов и физическую адсорбцию за счёт объёмного заполнения микро- и мезопор, а также полостей;

- химическую адсорбцию за счёт образования ковалентных и водородных связей с силикатными и алюмосиликатными группами сорбентов, а также за счёт образования водородных связей с аминогруппами сорбентов.

Пределные величины адсорбции резорцина сорбентами на основе сапропеля, рассчитанные по уравнению БЭТ (0,25–1,00 ммоль/г) и уравнению Дубинина–Радускевича (0,52–2,60 ммоль/г), сопоставимы с другими разработанными сорбентами.

Литература

1. Сазанова М.Л., Сазанов А.В., Жуйкова И.А., Тугаринов Л.В. Химический состав и сорбционная активность сапропелей (обзор) // Теоретическая и прикладная

экология. 2024. № 4. С. 26–36. doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-026-036

2. Юрак В.В., Апакашев Р.А., Лебзин М.С., Малышев А.Н. Композитные сорбенты из природного и техногенного сырья: оптимизация состава для рекультикации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 12-1. С. 177–191. doi: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177

3. Головина Е.А. Экология в России: современное состояние и актуальные проблемы // AgrarianHistory. 2021. № 8. С. 3–16. doi: 10.52270/27132447_2021_8_3

4. Pradeep N.V., Anupama S., Navya K., Shalini H.N., Idris M., Hampannavar U.S. Biological removal of phenol from wastewaters: a mini review // Appl. Water Sci. 2015. No. 5. P. 105–112. doi: 10.1007/s13201-014-0176-8

5. Villegas L.G.C., Mashhadi N., Chen M., Mukherjee D., Taylor K.E., Biswas N. A short review of techniques for phenol removal from wastewater // Curr. Pollut. Rep. 2016. V. 2. P. 157–167. doi: 10.1007/s40726-016-0035-3

6. Benaddi R., Osmane A., Zidan K., El Harfi K., Ouazzani N. A review on the adsorption of phenol derivatives from wastewater // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2023. V. 24. No. 4. P. 35–43. doi: 10.12912/27197050/162059

7. Belaib F., Meniai A.H., Bencheikh Lehocine M. Elimination of phenol by adsorption onto mineral/polyaniline composite solid support // Energy Proc. 2012. V. 18. P. 1254–1260. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.141

8. Николаева Л.А., Айкенова Н.Е. Адсорбционная очистка фенолсодержащих сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 136–142. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-136-142

9. Николаева Л.А., Голубчиков М.А. Очистка производственных сточных вод от нефтепродуктов модифицированными сорбционными материалами на основе карбонатного шлама // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 7. С. 51–58.

10. Беляева О.В., Голубева Н.С., Великанова Е.С., Гора Н.В. Использование новых углеродных адсорбентов для очистки воды от фенола // Техника и технология пищевых производств. 2012. № 1. С. 143–146.

11. Sarker N., Fakhruddin A.N.M. Removal of phenol from aqueous solution using rice straw as adsorbent // Appl. Water Sci. 2017. V. 7. P. 1459–1465. doi: 10.1007/s13201-015-0324-9

12. Daffalla S.B., Mukhtar H., Shaharun M.S. Preparation and characterization of rice husk adsorbents for phenol removal from aqueous systems // PLoS One. 2020. V. 15. No. 12. Article No. e0243540. doi: 10.1371/journal.pone.0243540

13. Зыкова И.В., Исаков В.А., Мишина Н.М. Сорбент для очистки сточных вод от фенолов, нефтепродуктов и тяжёлых металлов на основе термоокисленного сапропеля // Теоретическая и прикладная экология. 2025. № 3. С. 134–141. doi: 10.25750/1995-4301-2025-3-134-141

14. Зыкова И.В., Исаков В.А., Мишина Н.М. Адсорбция ионов меди (II) сорбентами на основе сапропеля // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2026. № 1. С. 83–93. doi: 10.24412/2071-6176-2026-1-82-92

15. Hahn S., Kielhorn J., Koppenhöfer J., Wibbertmann A., Mangelsdorf I. Resorcinol. World Health Organization, 2006. 72 p. [Электронный ресурс] <https://iris.who.int/handle/10665/43450> (дата обращения: 01.05.2026).

References

1. Sazanova M.L., Sazanov A.V., Zhuikova I.A., Tugarinov L.V. Chemical composition and sorption activity of sapropels: a review // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 4. P. 26–36 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-4-026-036

2. Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshov A.N. Composite sorbents from natural and man-made raw materials: optimization of composition for reclamation // MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 12-1. P. 177–191 (in Russian). doi: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_177

3. Golovina E.A. Ecology in Russia: current state and current problems // Agrarian History. 2021. No. 8. P. 3–16 (in Russian). doi: 10.52270/27132447_2021_8_3

4. Pradeep N.V., Anupama S., Navya K., Shalini H.N., Idris M., Hampannavar U.S. Biological removal of phenol from wastewaters: a mini review // Appl. Water Sci. 2015. No. 5. P. 105–112. doi: 10.1007/s13201-014-0176-8

5. Villegas L.G.C., Mashhadi N., Chen M., Mukherjee D., Taylor K.E., Biswas N. A short review of techniques for phenol removal from wastewater // Curr. Pollut. Rep. 2016. V. 2. P. 157–167. doi: 10.1007/s40726-016-0035-3

6. Benaddi R., Osmane A., Zidan K., El Harfi K., Ouazzani N. A review on the adsorption of phenol derivatives from wastewater // Ecological Engineering & Environmental Technology. 2023. No. 24. P. 35–43. doi: 10.12912/27197050/162059

7. Belaib F., Meniai A.H., Bencheikh Lehocine M. Elimination of phenol by adsorption onto mineral/polyaniline composite solid support // Energy Proc. 2012. V. 18. P. 1254–1260. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.141

8. Nikolaeva L.A., Aikenova N.E. Adsorption purification of phenol-containing wastewater from oil refineries // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 136–142 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-136-142

9. Nikolaeva L.A., Golubchikov M.A. Removal of oil products from industrial wastewater with the use of modified carbonate sludge-based sorption materials // Water supply and sanitary technique. 2016. No. 7. P. 51–58 (in Russian).

10. Belyaeva O.V., Golubeva N.S., Velikanova E.S., Gora N.V. Use of new carbon adsorbents for water cleaning from phenol // Food processing: techniques and technology. 2012. No. 1. P. 143–146 (in Russian).

11. Sarker N., Fakhruddin A.N.M. Removal of phenol from aqueous solution using rice straw as adsorbent // Appl. Water Sci. 2017. V. 7. P. 1459–1465. doi: 10.1007/s13201-015-0324-9

12. Daffalla S.B., Mukhtar H., Shaharun M.S. Preparation and characterization of rice husk adsorbents for phenol removal from aqueous systems // PLoS One. 2020. V. 15. No. 12. Article No. e0243540. doi: 10.1371/journal.pone.0243540

13. Zykhova I.V., Isakov V.A., Mishina N.M. Sorbent based on thermally oxidized sapropel for wastewater treatment from phenols, oil products and heavy metals // Theoretical and Applied Ecology. 2025. No. 3. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2025-3-134-141

14. Zykhova I.V., Isakov V.A., Mishina N.M. Adsorption of copper(II) ions by sapropel-based sorbents // Izvestiya TulGU. Natural sciences. 2026. No. 1. P. 83–93 (in Russian). doi: 10.24412/2071-6176-2026-1-82-92

15. Hahn S., Kielhorn J., Koppenhöfer J., Wibbertmann A., Mangelsdorf I. Resorcinol. World Health Organization, 2006. 72 p. [Internet resource] <https://iris.who.int/handle/10665/43450> (Accessed: 01.05.2026).

О возможности применения винной кислоты и её солей при утилизации отработанных электролитов меднения

© 2026. М. А. Шумилова, к. х. н., в. н. с., Ф. Ф. Чаусов, д. х. н., в. н. с.,
Д. К. Жиров, к. т. н., с. н. с., К. А. Новожилов, аспирант,
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
426067, Россия, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34,
e-mail: shumilovama@udman.ru

Отработанные электролиты, представляя угрозу для окружающей среды при несанкционированном сливе, являются вторичным источником получения цветных металлов. Проведены исследования по определению оптимальных условий и физико-химических закономерностей образования тартратов меди(II), полученных в результате осаждения отработанного электролита меднения растворами винной кислоты и её солей. Установлено, что мольное соотношение реагент:медь(II) для винной кислоты и тартрата аммония равняется 2:1, а для тартрата калия-натрия – 1,5:1. Степень извлечения меди из электролита превышает 98 % при pH 3,5–4,0. Найдено, что реакцию ионов меди с раствором винной кислоты лучше осуществлять в режиме синхронного осаждения, а взаимодействие с солями винной кислоты лучше проводить в варианте прямого осаждения. Описана работа предлагаемого технологического модуля по выделению концентратов меди из отработанного электролита. Ежегодно в России в гальванические стоки попадает до 2500 т меди стоимостью 580–620 тыс. руб./т; таким образом, использование предлагаемого модуля позволяет осуществить возврат ценного металла, обеспечивая существенную компенсацию затрат.

Ключевые слова: отработанный раствор меднения, винная кислота, калий-натрий виннокислый, тартрат аммония, прямое осаждение, синхронное осаждение, технологический модуль.

On the possibility of tartaric acid and its salts application when disposing of waste copper plating electrolytes

© 2026. М. А. Shumilova ORCID: 0000-0001-5582-0258[†]
F. F. Chausov ORCID: 0000-0003-4950-2370[†]
D. K. Zhirov ORCID: 0000-0003-4475-8561[†]
K. A. Novozhilov ORCID: 0009-0005-2905-471X[†]
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
34, T. Baramzinoy St., Izhevsk, Russia, 426067,
e-mail: shumilovama@udman.ru

Spent electrolytes, which pose a threat to the environment if unauthorized, are a secondary source for obtaining non-ferrous metals. Research has been conducted to determine the optimal conditions and physicochemical patterns of formation of copper(II) tartrates obtained as a result of precipitation of waste copper plating electrolyte (WCPE) with solutions of tartaric acid and its salts. It was established that the molar ratio of reagent:copper(II) for tartaric acid and ammonium tartrate is 2:1, and for potassium sodium tartrate – 1.5:1. The extraction ratio of copper from the electrolyte exceeds 98 % in the pH range of 3.5–4.0. We studied the effect of the order of reagent mixing on the completeness of metal ions extraction from WCPE, as well as the structure and composition of the resulting precipitates. It was found that the reaction of copper ions with a tartaric acid solution is best carried out in the synchronous precipitation mode, and the interaction with tartaric acid salts is best carried out in the direct precipitation mode. Using synchronous thermal analysis, it was proven that in the direct precipitation mode, monohydrate is formed, and in the synchronous mode, copper tartrate dihydrate is formed. Consequently, the production process technology must provide for the possibility of using both direct and synchronous deposition of metals, based on the optimal conditions for their isolation. The operation of the proposed technological module for the extraction of copper concentrates from spent electrolyte is described.

Keywords: waste copper plating solution, tartaric acid, potassium-sodium tartrate, ammonium tartrate, direct precipitation, synchronous precipitation, process module.

В настоящее время в связи с постоянно увеличивающейся индустриализацией общества проблемы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды становятся всё более актуальными. Широко используемое нанесение гальванических покрытий является способом защиты металлов от коррозии и улучшением качества готового изделия. Однако накопление в электролитах загрязнений приводит к необходимости их слива, который на разных предприятиях осуществляется от нескольких раз в год до одного раза в пять лет [1]. Отработанные электролиты являются концентрированными токсикантами и представляют угрозу для окружающей среды при их несанкционированном сливе. С другой стороны, их можно рассматривать как вторичный источник получения цветных металлов, высокая стоимость которых делает задачу возвращения металлов в виде новых востребованных продуктов весьма значимой [2, 3]. Существует несколько доступных технологий выделения и утилизации цветных металлов из отработанных электролитов: химическое осаждение, ионный обмен, мембранная фильтрация, адсорбция, электроосаждение, цементация и др. [4–7]. Реагентный метод [8] нашёл самое широкое применение в промышленности благодаря своей универсальности, простоте в эксплуатации и дешевизне. К тому же данный метод больше всего подходит для утилизации производственных растворов с высокой концентрацией меди (до 30 г/дм³), базируясь на переводе катионов меди(II) в малорастворимые соединения. Однако наряду с достоинствами этот метод обладает рядом существенных недостатков: сложность в выборе оптимального значения pH при избирательном осаждении, получение трудно отделяемых мелких и аморфных осадков, хранение и утилизация накапливающихся осадков, требующих всё возрастающих объёмов площадей. Решение этой проблемы заключается в переориентации гальванических производств с утилизации отходов на их регенерацию, позволяющую выделять катионы меди, количество которых доходит до 2500 т/год в сбросах сточных вод, возвращая их в производство и обеспечивая при этом очистку и сокращение объёмов производственных стоков.

Согласно литературным данным [9, 10] тартраты меди плохо растворяются в воде и хорошо отделяются от жидкой фазы фильтрованием, поэтому тартрат-ионы были исследованы в качестве реагентов-осадителей для отработанных растворов меднения (ОРМ).

Тартраты меди востребованы в качестве катализаторов органических реакций, в качестве фунгицидов и микроудобрений в сельском хозяйстве, лекарственных средств в ветеринарии, как прекурсоры для получения высокотемпературных сверхпроводников [11].

Несмотря на то, что тартраты меди известны давно, их строение и структура изучены сравнительно недавно. Изучение строения тартратов меди усложняется тем, что винная кислота имеет три стереоизомера (*L*-, *D*- и *мезо*-винная кислоты), а продажный препарат представляет собой их рацемическую смесь. Соответственно этому, возможно образование различных структур солей, часть из которых описана в литературе [12, 13]. Кроме этого, тартраты меди могут отличаться степенью замещения водорода в молекуле кислоты [14] и содержанием кристаллизационной воды [15]. Всё это определяет структурное разнообразие тартратов меди и свойств материалов на их основе.

Разработка и внедрение в производство технологии регенерационной утилизации отработанных медьсодержащих электролитов требует исследования основных физико-химических закономерностей реакции осаждения ионов меди(II) в виде тартратов.

Целью представленной работы является поиск оптимальных условий и изучение физико-химических закономерностей образования тартратов меди(II) при осаждении отработанного кислого электролита меднения растворами винной кислоты и её солей с получением легко отделяемых осадков, используемых в дальнейшем для производства новых продуктов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования был отработанный раствор кислого меднения АО «ИЭМЗ «Купол», исходный рабочий раствор которого состоит из медного купороса (120–240 г/дм³) и серной кислоты (50–100 г/дм³). Предметом исследования являются ресурсосберегающие технологии утилизации отработанного электролита кислого меднения.

Концентрацию ионов меди(II) в форме аммиакатов в надосадочной жидкости определяли спектрофотометрическим методом [16] на КФК-3 «ЗОМЗ» (АО «Загорский оптико-механический завод», Россия). Представленные концентрации являются средними величинами для трёх аналитических повторностей; значение относительного стандартного отклонения не превышает 4,5 %. Степень извлечения (СИ) ионов металла рассчитывали по формуле:

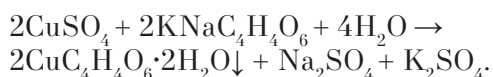
$$СИ = [(C_{нач} - C_{ост}) / C_{нач}] \cdot 100\%,$$

где $C_{нач}$ и $C_{ост}$ – начальная и остаточная концентрации меди(II) в пробе.

Величину pH в процессе осаждения контролировали с помощью лабораторного иономеров И-160МИ (ООО «Измерительная техника», г. Москва) со стеклянным (ЭС-10603) и хлорсеребряным (ЭСр-10103) электродами; погрешность измерения менее $\pm 0,03$. Рентгенофазовый анализ полученных осадков проводили на дифрактометре Miniflex-600 (Rigaku Inc.) в $Co-K_{\alpha}$ -излучении. Термогравиметрический и дифференциально-термический анализ (ТГА/ДТА) проводили на автоматизированном дериватографе Shimadzu-60Н в среде аргона в интервале от комнатной температуры до $500^{\circ}C$ при скорости нагрева образца $3^{\circ}C/мин$.

Результаты и обсуждение

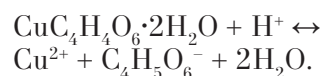
Синтез тартрата меди проходил в результате прибавления по каплям при непрерывном перемешивании 150 мл 0,7 моль/дм³ раствора калий-натрий виннокислого к 100 мл ОРМ, с концентрацией ионов меди 0,69 моль/дм³, при этом мольное соотношение реагентов составляло тартрат:медь(II) $\approx 1,5:1$. Протекающий процесс можно представить в виде следующего уравнения:



Как было установлено в ходе эксперимента, при мольном соотношении реагентов тартрат:медь(II) $\approx 1:1$ осадок меди виннокис-

лый не образуется, и лишь при 1,5-кратном избытке осадителя в течение 30–40 с после сливания реагентов в растворе выделяется голубовато-зелёный мелкодисперсный осадок соли меди. Осадок переносили на фильтр марки «синяя лента» и промывали дистиллированной водой до отрицательной реакции на сульфат-ионы (проба с хлоридом бария), затем сушили при комнатной температуре в эксикаторе.

Известно, что в кислой среде растворимость солей меди с винной кислотой увеличивается в результате образования кислой соли:



При значениях pH выше 6,0 возможно одновременное образование с солями и гидроксида меди, поэтому для получения чистых солей без посторонних примесей и с высоким выходом необходимо придерживаться определённого интервала pH. Поскольку осадок тартрата меди(II), полученный в результате применения разных реагентов-осадителей, может отличаться условиями образования соли и растворимостью в воде в зависимости от pH раствора, значит, у каждого варианта будет свой оптимальный диапазон pH, в котором соль кристаллизуется с максимальным выходом и без сопутствующих примесей. Именно поэтому для каждого варианта осадителя было исследовано влияние pH на полноту извлечения меди из ОРМ в виде осадка тартрата меди(II), результаты которого представлены в таблице 1.

Согласно экспериментальным данным, зафиксированное при pH < 2,0 уменьшение

Таблица 1 / Table 1

Степень извлечения меди винной кислотой и её солями из ОРМ в зависимости от pH / Copper(II) ions extraction ratio by tartaric acid and its salts from the waste copper plating solution depending on pH

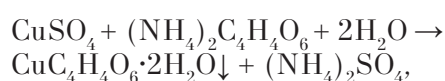
Реагент / Reagent	KNaC ₄ H ₄ O ₆					
pH	2,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
C _{ост} , г/дм ³ / C _{рес} , г·дм ⁻³	12,58	2,37	0,56	0,83	1,08	2,34
СИ, % / ER, %	71,29	94,60	98,72	98,11	97,53	94,66
Реагент / Reagent	(NH ₄) ₂ C ₄ H ₄ O ₆					
pH	2,5	3,0	3,35	3,6	4,0	4,3
C _{ост} , г/дм ³ / C _{рес} , г·дм ⁻³	3,01	1,20	0,78	1,29	1,31	1,64
СИ, % / ER, %	93,13	97,25	98,21	97,05	97,01	96,26
Реагент / Reagent	C ₄ H ₆ O ₆					
pH	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
C _{ост} , г/дм ³ / C _{рес} , г·дм ⁻³	2,33	0,98	0,89	0,74	0,83	1,01
СИ, % / ER, %	94,69	97,76	97,97	98,32	98,11	97,69

Примечание: C_{ост} – остаточная концентрации меди(II) в пробе; СИ – степень извлечения ионов металла.

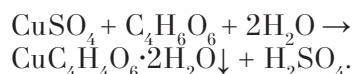
Note: C_{рес} – residual concentration of copper(II) in the sample; ER – extraction ratio of copper(II) ions.

выхода тартрата меди(II) связано с повышением его растворимости [6], а при $\text{pH} > 5$ – с началом выпадения в осадок гидроксосульфатов меди. Следовательно, оптимальной величиной pH извлечения тартрата меди, когда реагентом-осадителем являлась соль калий-натрий виннокислый, следует считать значения pH 3,7–4,1; в этих условиях содержание ионов меди в фильтрате понизилось примерно в 53 раза по сравнению с исходным 43,84 г/дм³ в ОРМ и степень извлечения меди превышала 98 %.

В соответствии с описанной выше методикой тартрат меди получали при добавлении к ОРМ 1,4М раствора тартрата аммония:



а также 1,4М раствора винной кислоты:



При варьировании соотношения между ОРМ и реагентами-осадителями было установлено, что в обоих случаях оптимальной величиной является молярное отношение 1:2. Полученные осадки обрабатывали по такой же процедуре, как было представлено в случае с виннокислым калием-натрием.

В соответствии с экспериментальными данными (табл. 1) для тартрата аммония оптимальная величина pH находится в диапазоне 3,2–3,5, а для винной кислоты – в области 3,5–4,0, степень извлечения меди превышает 98 %, а остаточная концентрация металла находится на уровне 0,78 и 0,74 г/дм³ соответственно.

Как было установлено, порядок смешения реагентов в оптимальных условиях не влияет на полноту осаждения и чистоту выделяемых осадков. Для моделирования процесса смешивания

отработанного электролита и осадителя, приближающего лабораторный эксперимент к промышленным условиям, использовали лабораторную установку (рис. 1, см. цветную вкладку IV), в которой оба реагента одновременно поступают в реактор (синхронное смешивание) в водный раствор с одинаковой скоростью с оптимальной величиной pH для каждого осадителя и при соответствующих молярных соотношениях.

В таблице 2 представлены остаточные концентрации ионов меди в растворе после синхронного и прямого осаждения винной кислотой и её солями. В случае с винной кислотой содержание ионов меди в растворе ниже и, соответственно, степень удаления металла выше при синхронном варианте осаждения. При использовании в качестве осадителей солей винной кислоты концентрация ионов меди меньше при прямом взаимодействии реагентов. В целом же, при синхронном осаждении меди винной кислотой наименьшая остаточная концентрация металла ниже его исходной концентрации примерно в 68 раз; в варианте с тартратом калия-натрия – примерно в 45 раз и с тартратом аммония – примерно в 36 раз. В варианте прямого осаждения зависимость носит обратный характер. Таким образом, в технологии производственного процесса необходимо предусмотреть возможность применения как прямого, так и синхронного осаждения металлов, исходя из оптимальных условий их выделения.

Дифрактограммы осадков тартрата меди, полученных в режимах прямого и синхронного осаждения, представлены на рисунке 2 (см. цв. вкладку IV). Можно сделать вывод, что получаемый в обоих изученных режимах осаждения продукт по своей структуре близок к ранее описанному в литературе дигидрату тартрата меди, наблюдаются лишь незначительные различия в ходе дифрактограмм.

Таблица 2 / Table 2

Влияние порядка смешивания реагентов на остаточную концентрацию ионов меди
The order of reagent mixing effect on the residual concentration of copper ions

Порядок смешивания реагентов The order of reagent mixing	Остаточная концентрация ионов меди при использовании реагента, г/дм ³ * Residual concentration of the copper ions while using the reagent, g·dm ⁻³		
	C ₄ H ₆ O ₆	KNaC ₄ H ₄ O ₆	(NH ₄) ₂ C ₄ H ₄ O ₆
Прямое осаждение / Direct precipitation	0,74	0,56	0,78
Синхронное осаждение / Synchronous precipitation	0,646	1,205	0,966

Примечание: * величина относительного стандартного отклонения не превышает 4,5 %.
Note: the relative standard deviation does not exceed 4.5 %.

М. А. Шумилова, Ф. Ф. Чаусов, Д. К. Жиров, К. А. Новожилов
«О возможности применения винной кислоты и её солей
при утилизации отработанных электролитов меднения». С. 123.

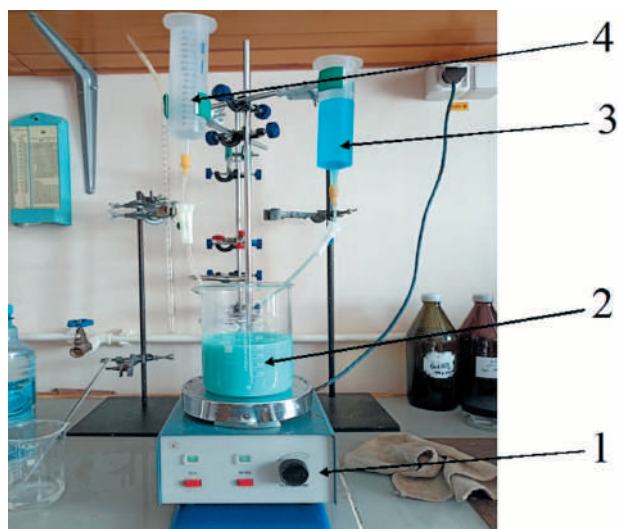


Рис. 1. Лабораторная установка для смешивания отработанного электролита и осадителя: 1 – магнитная мешалка; 2 – стакан; 3, 4 – расходные ёмкости для реагентов с регулятором расхода

Fig. 1. Laboratory installation for waste electrolyte and precipitant mixing: 1 – magnetic stirrer; 2 – glass; 3, 4 – reagent supply vessels with flow regulators

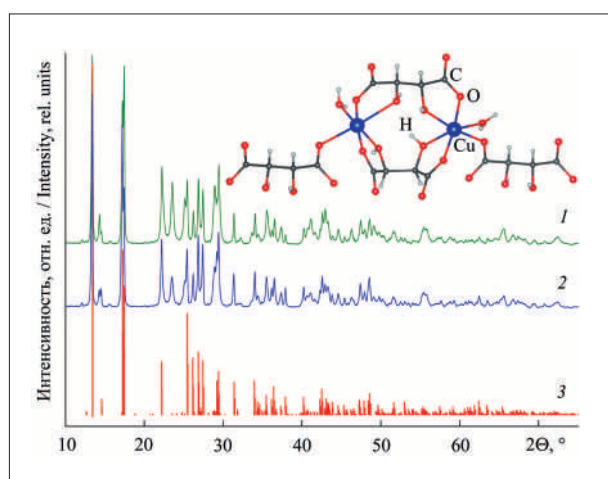


Рис. 2. Диффрактограммы осадков тартрата меди, полученных в режимах прямого (1) и синхронного (2) осаждения; расчётная диффрактограмма (3), построенная по данным [18] для структуры тартрата меди $\text{CuC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (на врезке) / **Fig. 2.** Diffraction patterns of copper tartrate precipitates obtained in direct (1) and synchronous (2) precipitation modes; the calculated diffraction pattern (3), according to data from [18] for the structure of copper tartrate $\text{CuC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (in the inset)

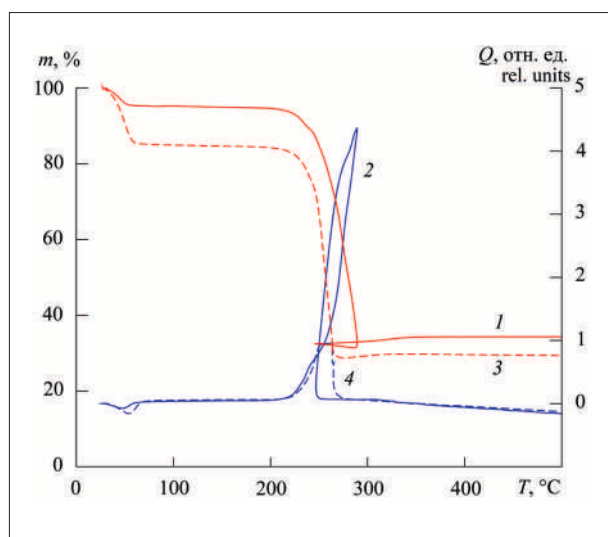


Рис. 3. Результаты ТГА/ДТА осадков тартрата меди, полученных в режимах прямого (1, 2) и синхронного (3, 4) осаждения. Зависимость массы образца m (кривые 1, 3) и теплового эффекта Q (2, 4) от температуры T / **Fig. 3.** Results of thermogravimetric and differential thermal analysis of copper tartrate precipitates obtained in direct (1, 2) and synchronous (3, 4) precipitation modes. Dependence of sample mass m (curves 1, 3) and thermal effect Q (2, 4) on the temperature T

Результаты ТГА/ДТА осадков тартрата меди, полученных в режимах прямого и синхронного осаждения, представлены на рисунке 3 (см. цв. вкладку IV). Можно отметить, что для образца, полученного прямым осаждением, потеря массы в интервале температур 50–80 °С составляет 6,9 %, что соответствует потере одной молекулы кристаллизационной воды и, соответственно, формуле $\text{CuC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Для образца, полученного синхронным осаждением, потеря массы в интервале 50–80 °С составляет 14,5 %, что соответствует потере двух молекул кристаллизационной воды по формуле $\text{CuC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Таким образом, при прямом режиме осаждения образуется моногидрат, а при синхронном – дигидрат тартрата меди. Моногидрат, полученный прямым осаждением, в интервале 200–290 °С бурно разлагается с выделением большого количества теплоты. Масса остатка составляет 34 %, что соответствует оксиду меди (II) CuO . Дигидрат, полученный синхронным осаждением, в указанном интервале температуры также разлагается с экзотермическим эффектом, но со значительно меньшим выделением теплоты. Масса осадка составляет 32 %, что также соответствует оксиду меди (II) CuO . Исследование различий в механизме термического разложения различных кристаллогидратов тартрата меди представляет отдельную интересную задачу.

С учётом условий протекания химических процессов, предлагается принципиальная схема технологической установки (универсального технологического модуля) для осаждения концентратов меди из отработанных технологических растворов, состоящей из оборудования периодического действия, которое после обезвреживания одного вида отходов переналаживается на обезвреживание другого вида (рис. 4).

Резервуар 1 предназначен для сбора и усреднения отработанных гальванических растворов, а резервуар 2 – для приготовления и хранения раствора осадителя. Целесообразно в качестве резервуаров 1 и 2 использовать пластмассовые ёмкости, армированные металлическим каркасом («еврокубы») с нижним выпуском раствора, к которым присоединены дозирующие насосы 3 и 4, предназначенные для дозирования отработанного раствора и осадителя, соответственно. Насосы приводятся в действие приводами с управляемой частотой вращения. Наиболее целесообразно использовать импульсные двигатели, приводимые в действие регулятором 5, который поддерживает заданную программу изменения скорости подачи растворов при поддержании постоянного соотношения их объёмов. Насосы подают отработанный раствор и раствор осадителя в реактор 6, который снабжён быстроходной (500–1500 об./мин.) мешалкой пропеллерного

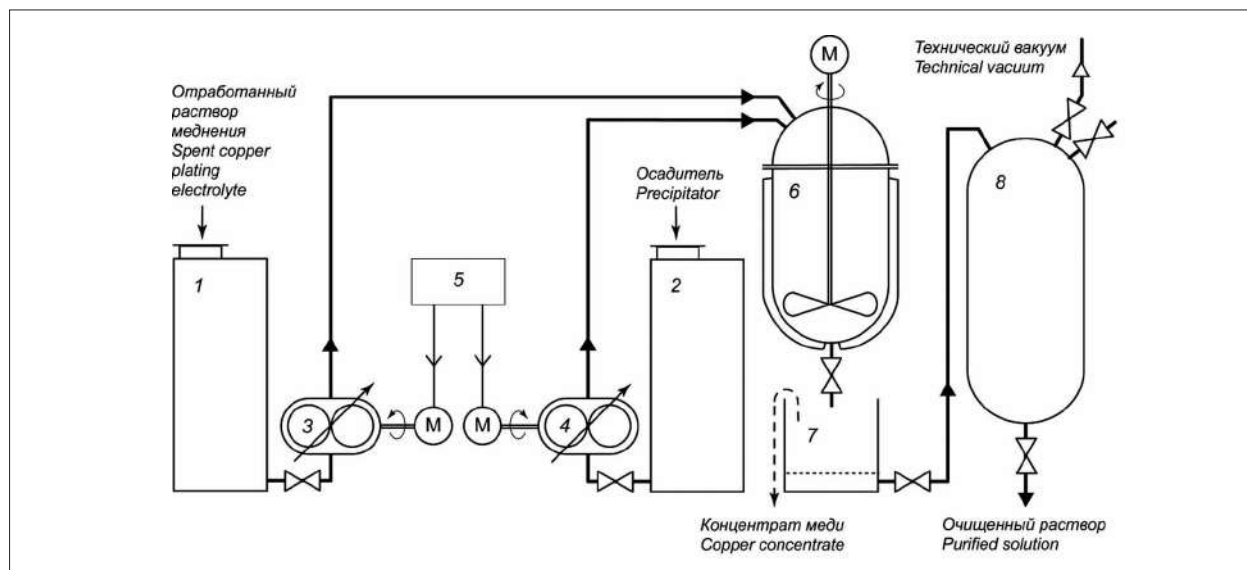


Рис. 4. Принципиальная схема модуля для выделения концентратов металлов из отработанных гальванических стоков: 1, 2 – резервуары для хранения отработанных растворов и осадителя;

3, 4 – насосы для дозирования отработанного раствора и осадителя;
5 – блок управления насосами; 6 – реактор; 7 – нутч-фильтр; 8 – вакуум-сборник

Fig. 4. Schematic diagram of the module for the separation of metal concentrates from galvanic wastewater: 1, 2 – tanks for storing spent solutions and precipitant;

3, 4 – pumps for dosing waste solution and precipitant;
5 – pump control unit; 6 – reactor; 7 – nutsche filter; 8 – vacuum collector

или фрезерного типа, приводимой в действие частотно-регулируемым приводом. Реактор должен иметь нижний выпуск для слива реакционной массы с осадком полученного концентрата металла. Для отделения осадка полученного концентрата металла от надосадочной жидкости предусмотрен нутч-фильтр 7, имеющий байковую фильтрующую перегородку. При наличии технической возможности он может быть заменён фильтрующей центрифугой. Для сбора очищенного раствора служит вакуум-сборник 8, соединённый с системой технического вакуума (остаточное давление 100–150 мм рт. ст.), создаваемый за счёт использования водокольцевых насосов или струйных водяных эжекторов.

Модуль работает следующим образом. Отработанные медьсодержащие растворы собирают в ёмкость 1. В ёмкость 2 загружают раствор осадителя, выбранный согласно результатам эксперимента, описанного выше. Открыв выпускные краны ёмкостей 1 и 2, включают блок управления 5 насосами 3 и 4 и устанавливают подачу раствора и осадителя в таком объёмном соотношении, которое отвечает оптимальному мольному соотношению ионов металла и осадителя. После заполнения реактора на 80 % прекращают подачу раствора насосом 3, подачу осадителя продолжают до накопления в реакторе избытка, необходимого для наиболее полного осаждения. Реакционную массу в реакторе продолжают перемешивать ещё 12–24 ч для протекания остальдовского созревания осадка. Затем, не выключая мешалку, реакционную массу выгружают в нутч-фильтр 7. Открыв кран вакуум-сборника, раствор из нутч-фильтра отсасывают в вакуум-сборник 8, а осадок на фильтре просасывают воздухом до наиболее полного удаления остатков раствора. Осадок с фильтра 7 может быть упакован в виде мало-водной пасты или окончательно обезвожен и высушен до состояния порошкообразного реагента для дальнейшего перевода в новый продукт, в предлагаемом варианте – тартрат меди.

Заключение

Экспериментально установлено, что оптимальной величиной рН осаждения ионов меди из отработанного электролита меднения с применением растворов винной кислоты и её солей находится в диапазоне 3,5–4,0 единиц рН, при этом степень извлечения металла превышает 98 %. Определено, что мольное соотношение ОРМ : реагент для калия-натрия виннокис-

лого равняется 1:1,5, а для винной кислоты и тартрата аммония – 1:2. Исследовано влияние порядка смешивания реагентов на полноту извлечения ионов металла из ОРМ, структуру и состав получаемых осадков. Зафиксировано, что при использовании винной кислоты наименьшая остаточная концентрация меди характерна при синхронном осаждении реагентов, в то время как при использовании солей винной кислоты минимальная остаточная концентрация наблюдается в случае прямого осаждения. Предложена принципиальная схема универсального технологического модуля с выделением концентрата меди из отработанных гальванических стоков меднения, основанная на технологии утилизации электролита. Описана его работа по получению нового продукта – тартрата меди, находящего применение в разнообразных производственных сферах. Таким образом, внедрение современной технологии утилизации медьсодержащих отработанных электролитов позволяет вернуть в производственный процесс более 90 % ценного компонента, существенно сокращая объём отходов гальванического производства и уменьшая его негативное воздействие на окружающую среду.

Литература

1. Ашуйко В.А., Акулич Н.Е., Иванова Н.П., Кандидатова И.Н. Получение окрашенных соединений меди из отработанных электролитов меднения и изучение возможности их использования в качестве антикоррозионных пигментов // Свиридовские чтения: сб. статей. Вып. 12. Минск: БГУ, 2016. С. 40–46.
2. Мажуга А.Г., Колесников В.А., Сахаров Д.А., Корольков М.В. Техногенные отходы I–II классов опасности – ресурс для получения вторичных продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 34–42. doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-061-067
3. Лемешев Д.О., Протасов А.С., Колесников В.А. Перспективы повторного использования и безопасной утилизации металлосодержащих отходов (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 140–147. doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-140-147
4. Миронов В.А., Шишкин А.Ю., Трейс Ю.К., Поляков А.В. Извлечение меди из водных растворов с использованием железных порошковых материалов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2018. № 1. С. 97–102.
5. Turaev D.Yu., Kolesnikov V.A., Popov A.N. Theoretical and practical basis of the regeneration and disposal of sulfuric copper etching solutions used in the production of printed circuit boards by membrane and membraneless electrolysis // Theor. Found. Chem. Eng. 2021. V. 55. No. 1. P. 80–90. doi: 10.1134/S0040579521010140

6. Dashti A., Amirkhani F., Jokar M., Mohammadi A.H., Chau K.W. Insights into the estimation of heavy metals ions sorption from aqueous environment onto natural zeolite // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 18. P. 1773–1784. doi: 10.1007/s13762-020-02912-9

7. Rahim A.R.A., Iswarya, Johari K., Shehzad N., Saman N., Mat H. Conversion of coconut waste into cost effective adsorbent for Cu(II) and Ni(II) removal from aqueous solutions // *Environ. Eng. Res.* 2021. V. 26. No. 4. Article No. 200250. doi: 10.4491/eer.2020.250

8. Акимов И.И., Хохлова Е.Ф. Очистка сточных вод от меди методом реагентного осаждения // *Сборник научных трудов XIII Национальной научно-технической конференции. М.: Союз машиностроителей России, 2024. С. 21–23. doi: 10.24412/CL-35807-2024-1-21-23*

9. Подчайнова В.Н., Симонова Л.Н. Медь. М.: Наука, 1990. 279 с.

10. Levanov A.V., Chukanova A.E., Isaikina, O.Ya. Solubility product of divalent copper salts with dicarboxylic acids // *Russ. J. Phys. Chem.* 2024. V. 98. P. 406–413. doi: 10.1134/S0036024424030117

11. Andriychenko E.O., Zelenov V.I., Bovyka V.E., Bukov N.N. Electrochemical synthesis of porous copper(II) oxide microparticles with rectangular hexagonal morphology // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. No. 4. P. 707–710. doi: 10.1134/S1070363221040204

12. Jian F., Zhao P., Wang Q. Synthesis and crystal structure of a novel tartrate copper(II) two-dimensional coordination polymer: $\{[\text{Cu}_2(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)_2(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}\}_\infty$ // *J. Coord. Chem.* 2005. V. 58. No. 13. P. 1133–1138. doi: 10.1080/00958970500148446

13. Albrecht S., Klüfers P. The structural chemistry of text-book species: the tartrato-cuprates in Fehling's solution // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2013. V. 639. No. 2. P. 280–284. doi: 10.1002/zaac.201200458

14. Al-Dajani M.T.M., Abdallah H.H., Mohamed N., Hemamalini M., Fun H.K. Diaquabis(hydrogen tartrato) copper(II) dihydrate // *Acta Crystallogr. Sect. E Struct. Rep. Online.* 2010. V. 66. Pt. 7. P. m774–m775. doi: 10.1107/s160053681002115x

15. Liu Y.H., Lee S.H., Chiang J.C., Chen P.C., Chien P.H., Yang C.I. Dehydration induced 2D-to-3D crystal-to-crystal network re-assembly and ferromagnetism tuning within two chiral copper(II)-tartrate coordination polymers // *Dalton Trans.* 2013. V. 42. No. 48. P. 16857–16867. doi: 10.1039/c3dt52330f

16. Аналитическая химия. Физические и физико-химические методы анализа / Под ред. О.М. Петрухина. М.: Химия, 2001. 496 с.

References

1. Ashujko V.A., Akulich N.E., Ivanova N.P., Kandidatova I.N. Obtaining colored copper compounds from spent copper electrolytes and studying the possibility of their use as anticorrosive pigments // *Sviridov readings:*

collection of articles. Iss. 12. Minsk: BGU, 2016. P. 40–46 (in Russian).

2. Mazhuga A.G., Kolesnikov V.A., Sakharov D.A., Korolkov M.V. Technogenic waste of I and II hazard classes – a resource for obtaining secondary products // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 34–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-061-067

3. Lemeshev D.O., Protasov A.S., Kolesnikov V.A. Modern methods of recovery, reuse and safe disposal of hazardous metal-containing waste // *Theoretical and Applied Ecology.* 2021. No. 4. P. 140–147 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-140-147.

4. Mironov V.A., Shishkin A.Yu., Trejs Yu.K., Polyakov A.A. Extraction of cooper from aqueous solutions using iron powder // *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2018. No. 1. P. 97–102 (in Russian).

5. Turaev D.Yu., Kolesnikov V.A., Popov A.N. Theoretical and practical basis of the regeneration and disposal of sulfuric copper etching solutions used in the production of printed circuit boards by membrane and membraneless electrolysis // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2021. V. 55. No. 1. P. 80–90. doi: 10.1134/S0040579521010140

6. Dashti A., Amirkhani F., Jokar M., Mohammadi A.H., Chau K.W. Insights into the estimation of heavy metals ions sorption from aqueous environment onto natural zeolite // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2021. V. 18. P. 1773–1784. doi: 10.1007/s13762-020-02912-9

7. Rahim A.R.A., Iswarya, Johari K., Shehzad N., Saman N., Mat H. Conversion of coconut waste into cost effective adsorbent for Cu(II) and Ni(II) removal from aqueous solutions // *Environ. Eng. Res.* 2021. V. 26. No. 4. Article No. 200250. doi: 10.4491/eer.2020.250

8. Akimov I.I., Khokhlova E.F. Wastewater treatment from copper by reagent deposition // *Collection of proceedings of the XIII National scientific and technical conference. Moskva: Soyuz mashinostroiteley Rossii, 2024. P. 21–23 (in Russian). doi: 10.24412/CL-35807-2024-1-21-23*

9. Podchaynova V.N., Simonova L.N. Copper. Moskva: Nauka Publ., 1990. 279 p.

10. Levanov A.V., Chukanova A.E., Isaikina O.Ya. Solubility product of divalent copper salts with dicarboxylic acids // *Russ. J. Phys. Chem.* 2024. V. 98. P. 406–413. doi: 10.1134/S0036024424030117

11. Andriychenko E.O., Zelenov V.I., Bovyka V.E., Bukov N.N. Electrochemical synthesis of porous copper(II) oxide microparticles with rectangular hexagonal morphology // *Russ. J. Gen. Chem.* 2021. V. 91. No. 4. P. 707–710. doi: 10.1134/S1070363221040204

12. Jian F., Zhao P., Wang Q. Synthesis and crystal structure of a novel tartrate copper(II) two-dimensional coordination polymer: $\{[\text{Cu}_2(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)_2(\text{H}_2\text{O})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}\}_\infty$ // *J. Coord. Chem.* 2005. V. 58. P. 1133–1138. doi: 10.1080/00958970500148446

13. Albrecht S., Klüfers P. The structural chemistry of text-book species: the tartrato-cuprates in Fehling's solution // *Z. Anorg. Allg. Chem.* 2013. V. 639. No. 2. P. 280–284. doi: 10.1002/zaac.201200458

14. Al-Dajani M.T.M., Abdallah H.H., Mohamed N., Hemamalini M., Fun H.-K. Diaquabis(hydrogen tartrato)copper(II) dehydrate // *Acta Crystallogr. Sect. E Struct. Rep. Online.* 2010. V. 66. Pt. 7. P. m774–m775. doi: 10.1107/s160053681002115x

15. Liu Y.H., Lee S.H., Chiang J.C., Chen P.C., Chien P.H., Yang C.I. Dehydration induced 2D-to-3D crystal-to-crystal network re-assembly and ferromagnetism tuning within two chiral copper(II)-tartrate coordination polymers // *Dalton Trans.* 2013. V. 42. No. 48. P. 16857–16867. doi: 10.1039/c3dt52330f

16. Analytical chemistry. Physical and physicochemical methods of analysis / Ed. O.M. Petrukhin. Moskva: Khimiya Publ., 2001. 496 p. (in Russian).

Очистка газовых выбросов нефтегазоконденсатных месторождений на гетерогенном катализаторе (на примере Среднеботуобинского месторождения)

© 2026. М. С. Иванова, к. х. н., доцент,
К. О. Томский, к. т. н., заведующий кафедрой,
Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова,
677000, Россия, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58,
e-mail: ims.06@mail.ru

Образующиеся при сгорании углеводородного топлива диоксиды углерода и серы могут улавливаться несколькими способами. Из них наиболее эффективным и экономически целесообразным способом является каталитический. Целью данной работы является изучение процесса каталитической очистки от диоксидов углерода и серы газов горения попутного нефтяного газа Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (СБНГКМ) во фторсодержащих средах, таких как суспензии фторида кальция с различными концентрациями, и определение оптимальных параметров проведения процесса очистки от диоксидов углерода и серы в рассматриваемых суспензиях. Исследование каталитической очистки от диоксидов углерода и серы в среде суспензий фторидов кальция проводили при атмосферном давлении и температуре, равной 25 °С. Диоксиды углерода и серы пропускали через систему, состоящую из суспензии фторида кальция с концентрациями в пределах от 0,05 М до 1,4 М. Для определения влияния скорости подачи очищаемых газов на сорбцию суспензией фторида кальция CO_2 пропускали при скоростях подачи от 0,03 до 0,118 л/мин. Для восстановления каталитической способности отработанной суспензии фторида кальция через систему пропускали кислород воздуха в течение 1 ч. В результате проведенной регенерации каталитическая система полностью восстанавливала свои окислительные способности. В работе показана принципиальная возможность проведения каталитической очистки газов горения в среде фторида кальция от CO_2 и SO_2 . На примере попутного нефтяного газа СБНГКМ определены оптимальные параметры очистки: скорость подачи газов в сорбент, равная 100 мл/мин, и концентрация каталитической системы, равная 0,4 моль/л.

Ключевые слова: диоксид углерода, каталитическая очистка выбросов газов, фторид кальция, выбросы углекислого газа, гетерогенные фторсодержащие системы, активация диоксида углерода.

Purification of gas emissions of Srednebotuobinskoe oil-gas condensate field on a heterogeneous catalyst

© 2026. M. S. Ivanova ORCID: 0000-0003-3272-9253, K. O. Tomskii ORCID: 0000-0001-7612-5393
M. K. Ammosov North-Eastern Federal University,
58, Belinskogo St., Yakutsk, Russia, 677027,
e-mail: ims.06@mail.ru

Carbon and sulfur dioxide formed during the combustion of hydrocarbon fuels can be captured in several ways. Of these, catalytic capture is the most effective and cost-effective. The aim of this study was to investigate the catalytic removal of carbon dioxide and sulfur from associated petroleum gas combustion gases at the Srednebotuobinskoye oil and gas condensate field in fluorine-containing media, such as calcium fluoride suspensions with varying concentrations, and to determine the optimal parameters for the removal of carbon dioxide and sulfur from these suspensions. The catalytic removal of carbon dioxide and sulfur from calcium fluoride suspensions was studied at atmospheric pressure and a temperature of 25 °C. Carbon and sulfur dioxides were passed through a system consisting of a calcium fluoride suspension with concentrations ranging from 0.05 M to 1.4 M. To determine the effect of the feed rate of the gases being purified on the sorption of the calcium fluoride suspension, CO_2 was passed at feed rates from 0.03 to 0.118 L/min. To restore the catalytic capacity of the spent calcium fluoride suspension, atmospheric oxygen was passed through the system for 1 hour. As a result of the regeneration, the catalytic system completely restored its oxidizing capacity. The study demonstrates the fundamental possibility of catalytic purification of combustion gases in a calcium fluoride environment to remove CO_2 and SO_2 . Using the associated petroleum gas of the Srednebotuobinskoye oil condensate field as an example, the optimal purification parameters were determined: a gas feed rate to the sorbent of 100 mL/min and a catalytic system concentration of 0.4 mol/L.

Keywords: carbon dioxide, catalytic purification of gas emissions, calcium fluoride, carbon dioxide emissions, heterogeneous fluorine-containing systems, carbon dioxide activation.

Одним из самых крупных месторождений, разрабатываемых на сегодняшний день в одном из арктических регионов Российской Федерации, является Среднеботуобинское нефтегазоконденсатное месторождение (СБНГКМ). Рассматриваемое месторождение является одним из самых перспективных источников углеводородного сырья не только на территории Восточной Сибири, но и во всей Российской Федерации. Ещё одной особенностью месторождения является то, что СБНГКМ находится в довольно большой изоляции от инфраструктурных объектов, что усложняет различные возможности переработки попутного нефтяного газа, добываемого с месторождения. Таким образом, вопрос утилизации попутного нефтяного газа, а также продукта его горения является актуальной задачей в условиях СБНГКМ.

На сегодняшний день согласно № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 02 июля 2021 г. компании недропользователи должны сокращать выбросы парниковых газов, основным из которых является диоксид углерода.

Спрос на энергию быстрой индустриализации приводит к крупномасштабному сжиганию ископаемого топлива, что вызывает чрезмерные выбросы углекислого газа и диоксида серы [1, 2]. Поскольку пагубное воздействие CO_2 и SO_2 на окружающую среду привлекло значительное внимание, были разработаны различные стратегии для уменьшения накопления диоксидов углерода и серы в атмосфере, среди которых улавливание и утилизация считаются многообещающими вариантами сокращения выбросов CO_2 и SO_2 . В настоящее время разработано множество абсорбентов указанных диоксидов для облегчения их улавливания и десорбции. Тем не менее, значительная энергия, необходимая для регенерации сорбента и отделения диоксидов, не способствует реализации стратегии по уменьшению выбросов кислых газов в атмосферу [3–5].

Доля углеводородного топлива, используемого в качестве энергоносителя, постоянно растёт. В ближайшем обозримом будущем говорить о возможности перехода на альтернативные, неуглеводородные источники энергии практически невозможно [6, 7]. Несмотря на то, что доля используемого природного газа, считающегося одним из наиболее экологичных видов топлива, постоянно растёт [8], говорить о полной безопасности данного вида топлива для окружающей среды невозможно [9, 10].

В результате полного сгорания любого углеводородного топлива неизбежным остаётся образование диоксида углерода, одного из самых распространённых парниковых газов на планете [11]. Вместе с тем, с увеличением содержания сернистых соединений во многих месторождениях, наряду с диоксидом углерода, ещё одним ожидаемым кислым газом в продуктах горения является диоксид серы [12, 13].

Основные методы, используемые для очистки газов горения от диоксидов углерода и серы, можно разделить на два типа – сорбционные и каталитические [14, 15]. Наиболее интересным и эффективным способом очистки газов от нежелательных компонентов из представленных способов является применение каталитических методов. Существенным преимуществом каталитических методов очистки дымов от диоксидов углерода и серы можно назвать высокую эффективность технологического оборудования, используемого для этих целей [16, 17]. Основным лимитирующим фактором использования каталитических методов очистки, как правило, считается высокая стоимость используемых реагентов и сложность регенерации катализаторов [18, 19].

Ещё одной проблемой сорбционных методов очистки газов от кислых компонентов является дальнейшая утилизация поглощённых газов. В отличие от физической сорбции диоксидов углерода и серы, одновременное преобразование CO_2 и SO_2 при сорбции в ценные химические вещества представляет собой наиболее привлекательный вариант [20, 21]. В последние десятилетия конверсия диоксидов углерода и серы вызвала серьёзную обеспокоенность и активно изучалась [22, 23]. Однако в большинстве процессов конверсии необходимы чистые газы или газы высокого давления, а это означает, что CO_2 и SO_2 из атмосферы или промышленных выбросов нельзя применять напрямую в качестве источника сырья для дальнейшего использования, и, таким образом, этот вопрос по-прежнему остаётся нерешённым при улавливании и отделении диоксидов углерода и серы. Поэтому реализация одновременного улавливания и преобразования диоксидов углерода и серы на месте выбросов в промышленных масштабах остаётся сложной задачей. Появление эффективных абсорбентов и развитие возможности использования диоксидов углерода и серы являются одной из наиболее интересных задач современности [24].

Выбрасываемый диоксид серы, как кислый газ, может образовывать кислотные дожди и смог, наносящие вред окружающей среде; кроме того, этот газ может негативно влиять на здоровье человека. Типичная концентрация диоксида серы в дымовых газах находится в пределах 0,05–0,3 об. %. Улавливание оксида серы (IV) из дымовых газов является сложной задачей из-за его низкой концентрации. Для улавливания низких концентраций SO_2 существует несколько методов, таких как абсорбция ионными жидкостями и сорбция на основе кальция [25]. Хотя абсорбция SO_2 через ионные жидкости имеет некоторые преимущества, так как используемые жидкости не летучи и не горючи, основными её недостатками являются высокая стоимость и высокая вязкость. Поэтому применение этих жидкостей весьма ограничено. Кроме того, сорбенты на основе кальция являются нерегенеративными, что ограничивает их использование для очистки дымовых газов крупных заводов. Среди различных методов абсорбция газа является подходящим методом для улавливания газообразных загрязнителей, таких как CO_2 и SO_2 из дымовых газов. Некоторые свойства сорбентов, такие как термическая стабильность, сделали их подходящими материалами для разделения и регенерации.

В работе представлен каталитический способ очистки отходящих газов горения углеводородного топлива с кислыми компонентами от диоксидов углерода и серы в среде суспензий фторида кальция. Особенности очистки газов таким способом являются простота регенерации используемого катализатора, проведение процесса очистки при нежёстких условиях, при атмосферном давлении и стандартной температуре, и при этом достигается почти полная очистка отходящих дымовых газов от диоксидов углерода и серы.

Целью работы является определение оптимальных параметров очистки диоксидов углерода и серы в среде фторидов кальция и изучение возможности регенерации катализатора кислородом воздуха.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели в работе решается ряд задач, связанных с подбором оптимальных условий проведения очистки, и проводятся экспериментальные исследования для восстановления способности суспензий фторидов кальция улавливать оксиды углерода (IV) и серы (IV).

Определение компонентного составапутного нефтяного газа проводили по ГОСТ 31371.3-2008. Состав газа определяли на газовом хроматографе SHIMADZU GC-2010 Plus. Исследование каталитической очистки диоксидов серы и углерода в среде суспензий фторидов кальция проводили при стандартных условиях.

Получение SO_2 для проведения исследований производилось реакцией взаимодействия сульфита натрия с соляной кислотой. Полученный диоксид серы пропускали через систему, состоящую из суспензии фторида кальция с различными концентрациями, в пределах от 0,05 М до 1,4 М. При тех же концентрациях фторида кальция исследовали поглощение диоксида углерода, который в систему пропускали из баллона.

Для поддержания равномерности содержания фторида кальция вследствие гетерогенности системы суспензию в постоянном режиме перемешивали с помощью магнитной мешалки.

Для определения окончания превращений системой диоксида серы на выходе из системы непрореагировавший SO_2 улавливали 0,001 М раствором бихромата калия, по изменению окраски последнего определяли пропускание диоксида серы через систему с суспензией фторида кальция.

Диоксид углерода, который после насыщения каталитической системы не сорбировался в суспензию на выходе, поглощали 0,4 М NaOH. Затем количество диоксида углерода, которое не было поглощено системой, высчитывали с использованием pH-титрования 1 М раствором соляной кислоты.

Исследование возможности очистки от диоксидов углерода и серы проводили при различных скоростях подачи очищаемых газов от 0,03 до 0,118 л/мин. Скорость подачи газа изменяли краном тонкой регулировки.

Для восстановления каталитической способности отработанной суспензии фторида кальция через систему пропускали кислород воздуха в течение 1 ч. В результате проведённой регенерации каталитическая система полностью восстанавливала свои окислительные способности.

Все количественные данные оценивали с помощью коэффициента Стьюдента при уровне доверительной вероятности $P = 0,95$.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых испытаний были получены хроматографические пики, представленные на рисунке 1.

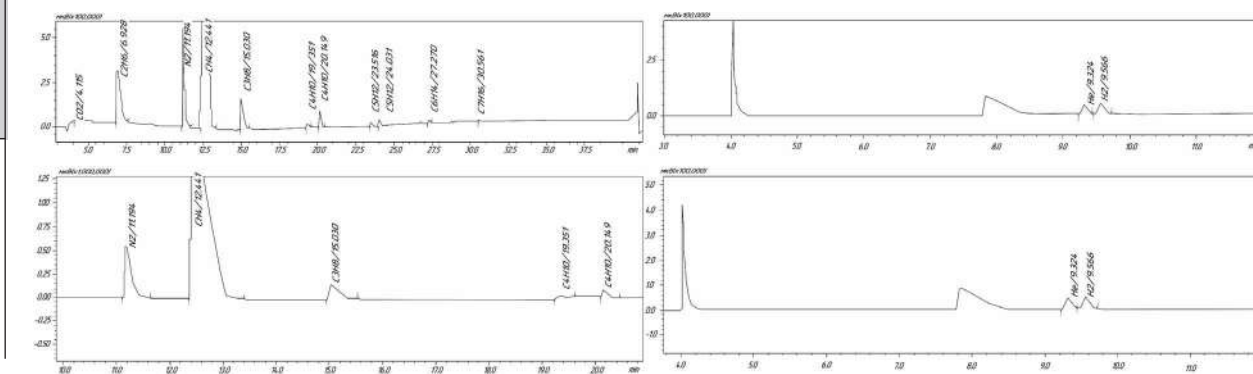


Рис. 1. Хроматограмма состава попутного нефтяного газа Среднеботуобинского НГКМ
Fig. 1. Chromatogram of the associated petroleum gas composition from the Srednebotuobinskoye oil-gas condensate field

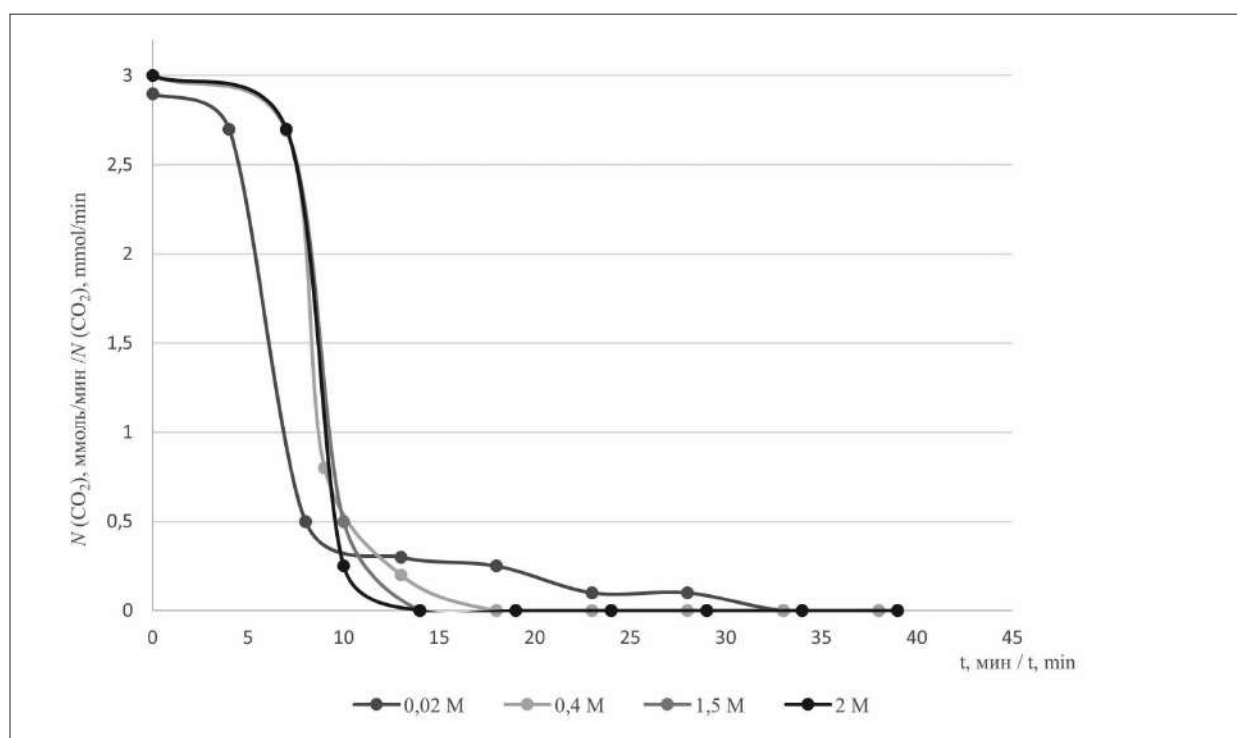


Рис. 2. Зависимость скорости поглощения диоксида углерода от времени пропускания газа при различных концентрациях суспензии фторида кальция
Fig. 2. Dependence of the rate of carbon dioxide absorption on the gas transmission time at different concentrations of calcium fluoride suspension

Обработка полученных данных показала следующий состав попутного нефтяного газа в мольных долях, %: $\text{He} - 0,43$, $\text{H}_2 - 0,0019$, $\text{CO}_2 - 0,0134$, $\text{C}_2\text{H}_6 - 3,23$, $\text{O}_2 - 0,0258$, $\text{N}_2 - 6,35$, $\text{CH}_4 - 87,63$, $\text{C}_3\text{H}_8 - 1,64$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10} - 0,016$, $n\text{-C}_4\text{H}_{10} - 0,55$, $\text{neo-C}_5\text{H}_{12} - 0,0035$, $i\text{-C}_5\text{H}_{12} - 0,0166$, $n\text{-C}_5\text{H}_{12} - 0,07$, $\text{C}_6\text{H}_{14} - 0,0104$, $\text{C}_7\text{H}_{16} - 0,0048$, $n\text{-C}_8\text{H}_{18} - 0,0037$, $\text{R-SH} - 0,0008$.

Результаты показывают, что доля углеводородных компонентов в попутном нефтяном газе составляет более 93 % мол. Дальнейшее сжигание газа такого состава приводит к образованию основного компонента парникового газа – диоксида углерода, а также диоксида серы.

В результате проведённых исследований по поглощению диоксида серы суспензиями фторида кальция различных концентраций были получены кривые, представленные на рисунке 2. Как видно из представленных данных, в первые моменты пропускания происходит полное поглощение очищаемого газа, о чём свидетельствуют начальные прямолинейные участки кривых, значения которых практически не отличаются от скоростей подачи газов в систему.

Для определения влияния концентрации суспензии на количество окисляемого диоксида углерода были посчитаны площади под

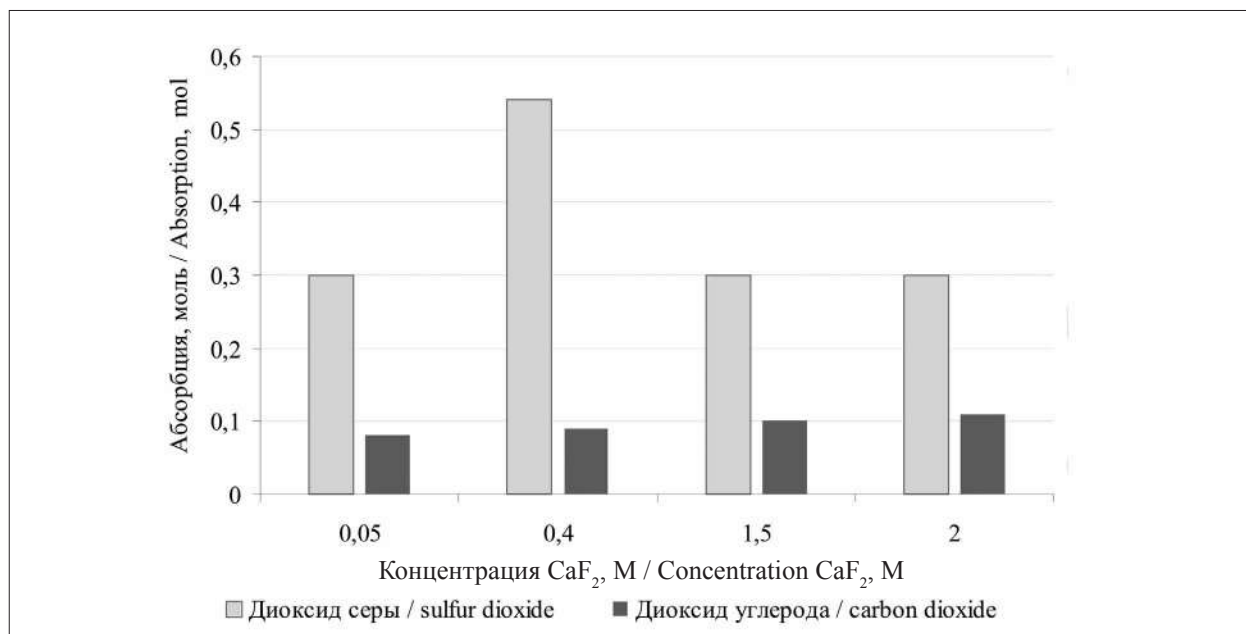


Рис. 3. Зависимость количества поглощённого газа от концентрации фторида кальция (при расчёте на 1 л суспензии)

Fig. 3. Dependence of the absorbed gas amount on the concentration of calcium fluoride (per 1 liter of suspension)

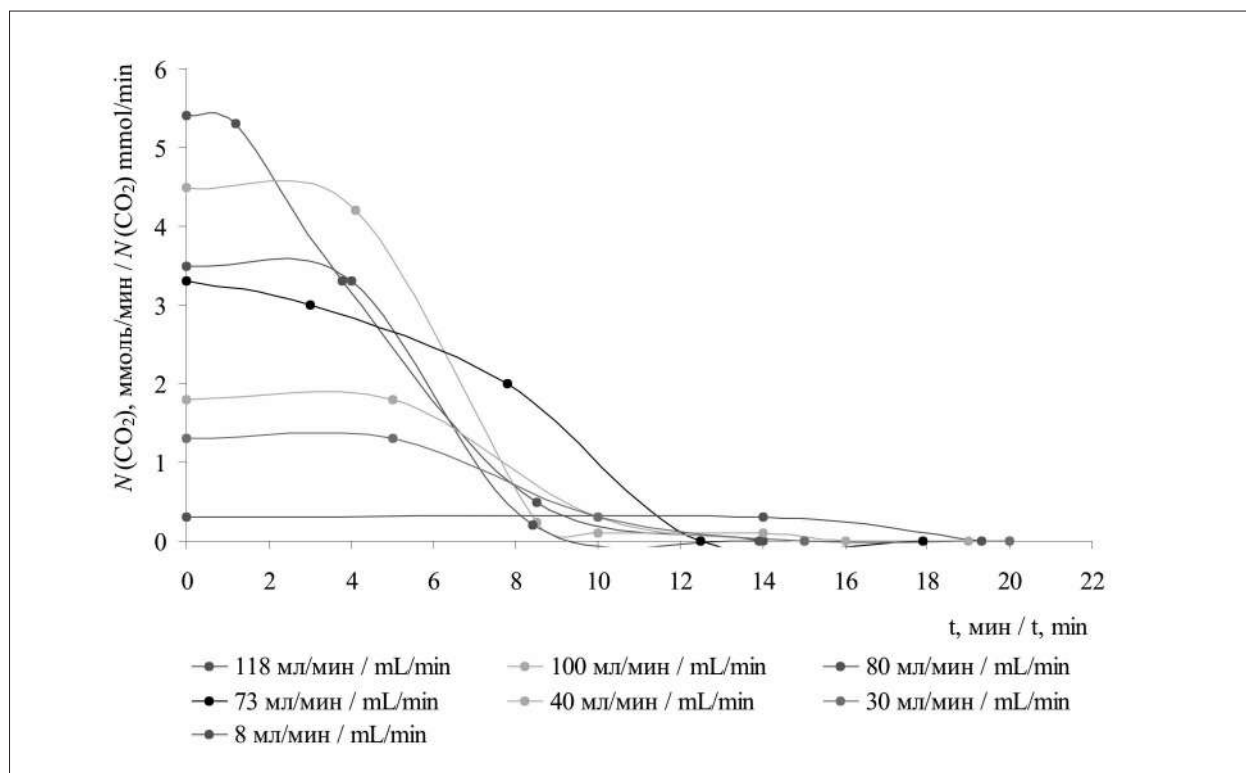


Рис. 4. Зависимость молярной скорости поглощения диоксида углерода от времени при различных скоростях подачи газа

Fig. 4. Dependence of the molar rate of carbon dioxide absorption on time at different gas flow rates

экспериментальными кривыми. Полученные результаты свидетельствуют о том, что, начиная с концентрации фторида кальция, равной 0,4 М, количество улавливаемого диоксида углерода лежит в пределах ошибки определения (рис. 3).

Как видно из представленных данных на рисунке 3, максимальное количество SO_2 сорбируется при концентрации CaF_2 , равной 0,4 М. Таким образом, для дальнейшего определения влияния скорости подачи на сорбцию диоксида углерода была выбрана суспензия с концентрацией 0,4 М CaF_2 .

Скорость подачи диоксидов в сорбционную систему варьировала от 8 до 118 мл/мин. Полученные результаты представлены на рисунке 4. Увеличение скорости более, чем в 14 раз не ухудшает поглотительные способности рассматриваемой системы. По данным представленных кривых в первые минуты пропускания газов поглощение происходит полное, что подтверждается рассчитанной скоростью поглощения газа каталитической системой, равной скорости подачи газов. Общее количество поглощённого газа, рассчитанное по полученным кривым, представлено на рисунке 5.

При этом количество поглощаемого диоксида углерода при изменении скорости

подачи от 8 до 100 мл/мин постоянно растёт, что объясняется увеличением количества подаваемого газа в систему. Дальнейшее возрастание скорости подачи газа приводит к резкому уменьшению абсорбции подаваемого газа примерно на 40 %, что происходит вследствие уменьшения времени взаимодействия каталитической системы с подаваемым диоксидом углерода.

Технологическая схема каталитической очистки отходящих дымовых газов от диоксидов серы и углерода представлена на рисунке 6. Очищаемый газ подаётся в систему, состоящую из ёмкости с 0,4 М фторидом кальция. При прохождении очищаемого газа через суспензию фторида кальция происходит избирательное поглощение диоксидов углерода и серы. При насыщении каталитической системы очищаемыми газами поток газа направляется на вторую систему с раствором фторида кальция. Регенерация отработанной суспензии проводится пропуском воздуха в систему.

Заключение

В работе обоснован и экспериментально подтверждён принципиально новый подход

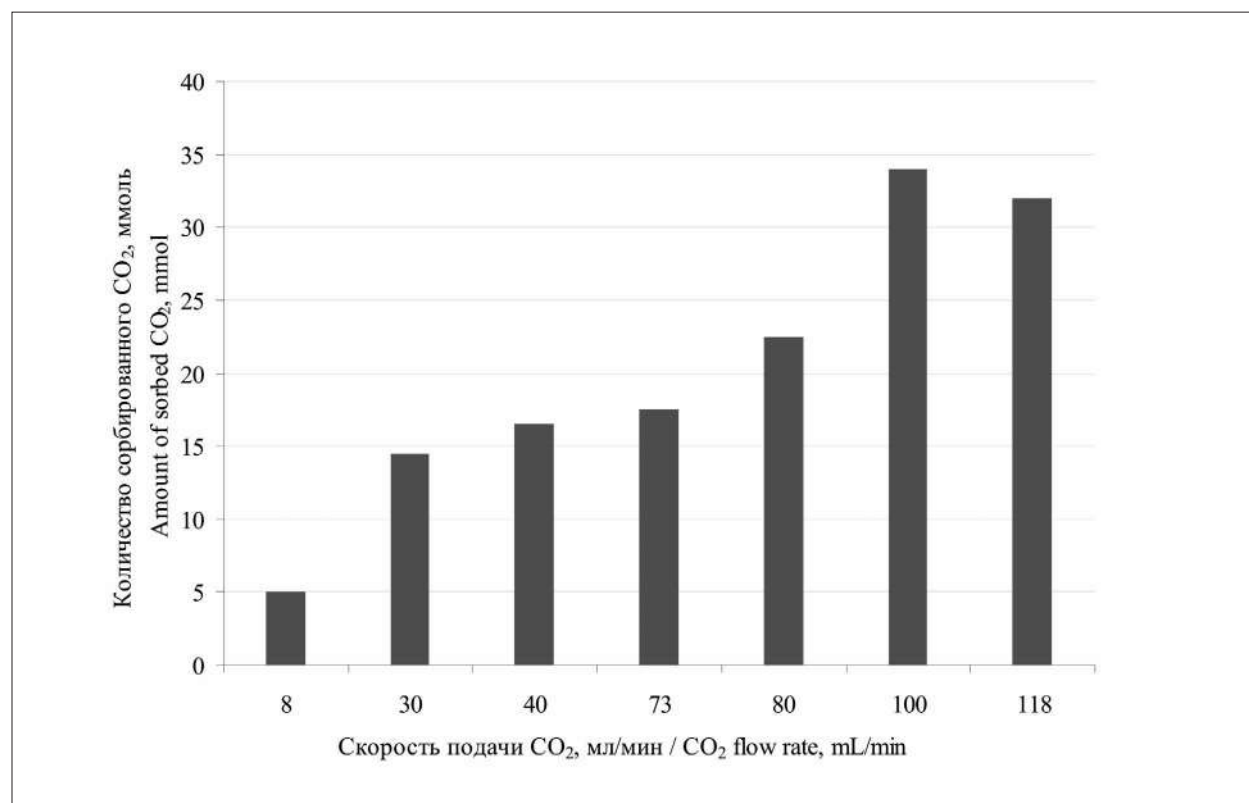


Рис. 5. Зависимость общего количества поглощённого газа от скорости подачи диоксида углерода
Fig. 5. Dependence of the total amount of absorbed gas on the rate of carbon dioxide supply

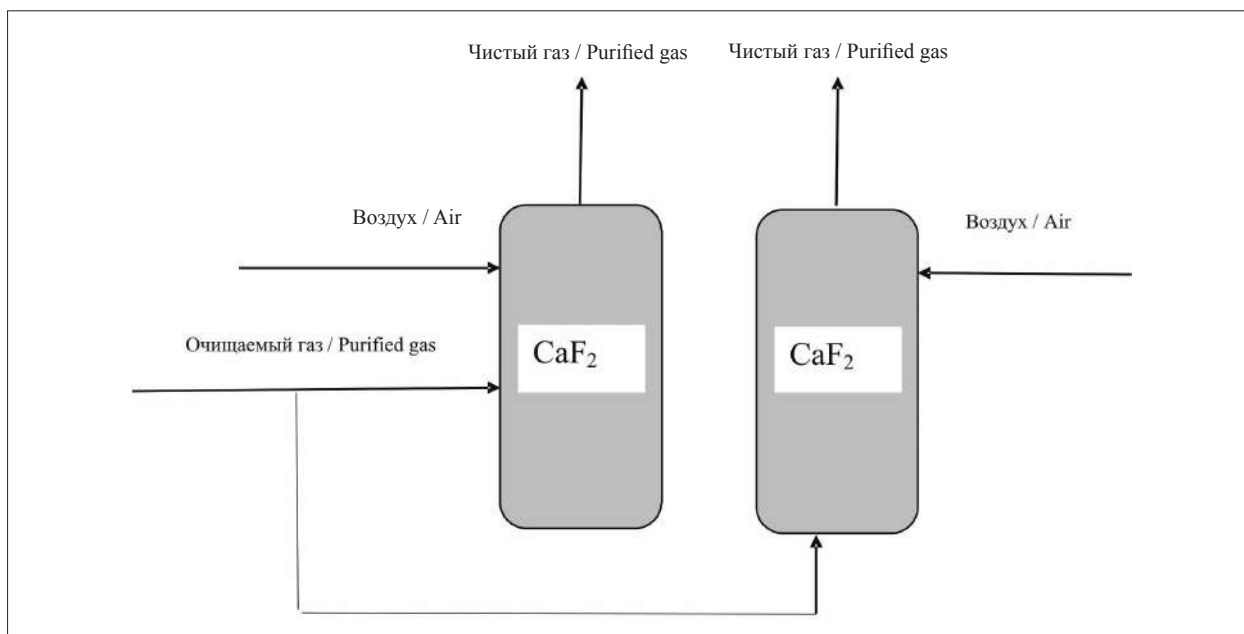


Рис. 6. Технологическая схема каталитической очистки отходящих дымовых газов от диоксидов серы и углерода
Fig. 6. Technological scheme of exhaust fumes catalytic purification from sulfur and carbon dioxide

к очистке газовых выбросов нефтегазоконденсатных месторождений от кислых компонентов с использованием гетерогенной фторсодержащей системы – суспензии фторида кальция.

В отличие от традиционных сорбционных методов (например, на основе ионных жидкостей или нерегенерируемых кальциевых сорбентов) и гомогенных фторсодержащих сред, предложенная система обладает рядом уникальных черт:

- впервые показана возможность использования суспензии CaF_2 в качестве каталитической среды для одновременного улавливания и активации CO_2 и SO_2 при стандартных условиях (атмосферное давление, 25°C);

- установлена способность системы к полной регенерации окислительных свойств при пропускании кислорода воздуха, что решает проблему утилизации отработанных катализаторов и снижает эксплуатационные затраты.

Теоретическая значимость работы выходит за рамки прикладной задачи очистки газов и вносит вклад в фундаментальные представления о гетерогенном катализе во фторсодержащих средах.

Работа развивает теорию, согласно которой фторсодержащие среды способны переводить растворённый кислород в активную форму, что ведёт к образованию промежуточных пероксосоединений. Эти соединения, в свою очередь, инициируют активацию стабильной молекулы CO_2 , превращая её в реакционно-способную форму.

Теоретически обосновано преимущество перехода от гомогенных фторсодержащих систем к гетерогенным суспензиям. Показано, что такой переход позволяет преодолеть фундаментальные трудности разделения продуктов реакции и снизить агрессивность среды, сохранив при этом высокую каталитическую активность.

Выявлены зависимости сорбционной способности от концентрации суспензии и скорости потока газа. Показано существование порогового значения концентрации ($0,4\text{ M}$), выше которого увеличение количества активного компонента не приводит к росту поглощения, что указывает на лимитирование процесса на стадии химического взаимодействия, а не диффузии.

Практическая ценность работы обусловлена ориентацией на реальные условия эксплуатации СБНГКМ и других удалённых арктических месторождений. Метод не требует жёстких условий (высокое давление, экстремальные температуры) и сложной инфраструктуры, что критически важно для месторождений, удалённых от промышленных центров. Кроме того, CaF_2 – доступный и распространённый на территории РФ реагент. Использование фторида кальция в сочетании с лёгкой регенерацией кислородом воздуха существенно снижает стоимость очистки по сравнению с применением дорогостоящих и вязких ионных жидкостей или нерегенерируемых сорбентов.

В дальнейшем перспективным направлением является исследование возможности направленного синтеза ценных продуктов (например, щавелевой кислоты) из активированного CO₂ непосредственно в суспензии, что позволит перейти от простой очистки к производству товарной продукции из отходов сгорания.

Литература

1. Gambhir A., Tavoni M. Direct air carbon capture and sequestration: how it works and how it could contribute to climate-change mitigation // *One Earth*. 2019. V. 1. No. 4. P. 405–409. doi: 10.1016/j.oneear.2019.11.006
2. Wu H., Chen W., Wu J., Zheng Z., Duan L. Synergistic removal of SO_x and NO_x in CO₂ compression and purification in oxy-fuel combustion power plant // *Energy Fuels*. 2019. V. 33. No. 12. P. 12621–12627. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b03284
3. Антонов К.Л., Поддубный В.А., Маркелов Ю.И., Бувевич А.Г., Медведев А.Н., Манжуров И.Л. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России // *Арктика: экология и экономика*. 2018. № 1. С. 56–67. doi: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67
4. Эшмухамедов М.А., Понамарёва Т.В., Раевская Е.Г. Очистка газовых выбросов от диоксида серы с помощью активированного гранулированного сорбента // *Химическая безопасность*. 2020. Т. 4. № 1. С. 170–182. doi: 10.25514/CHS.2020.1.17012
5. Khairulin S.R., Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A., Salnikov A.V., Loginov L.I., Philippov A.G., Vildanov A.F., Mazgarov A.M. Carbon materials for cleaning gases from hydrogen sulfide and prospects for their use in base technologies for associated petroleum gas treatment // *Chemistry for sustainable development*. 2018. V. 26. No. 6. P. 679–689. doi: 10.15372/CSD820180615
6. Bellamy R., Geden O., Fridahl M., Cox E., Palmer J. Editorial: Governing carbon dioxide removal // *Front. Clim.* 2021. V. 3. Article No. 816346. doi: 10.3389/fclim.2021.816346
7. Moustakas N.G., Lorenz F., Dilla M., Peppel T., Strunk J. Pivotal role of holes in photocatalytic CO₂ reduction on TiO₂ // *Chemistry*. 2021. V. 27. No. 68. P. 17213–172196. doi: 10.1002/chem.202103070
8. Yu H.B., Huang J.H., Jiang L.B., Leng L.J., Yi K.X., Zhang W., Zhang C.Y., Yuan X.Z. *In situ* construction of Sn-doped structurally compatible heterojunction with enhanced interfacial electric field for photocatalytic pollutants removal and CO₂ reduction // *Appl. Catal. B: Environ.* 2021. V. 298. Article No. 120618. doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120618
9. Шепелев И.И., Пиляева О.В., Еськова Е.Н., Кирюшин Е.В. Решение проблем очистки газовых выбросов в глинозёмном производстве // *Проблемы региональной экологии*. 2020. № 1. С. 111–115. doi: 10.24441/1728-323X-2020-11111

10. Блиновская Я.Ю., Мазлова Е.А. Выбросы парниковых газов при добыче и переработке угля: состояние проблемы и технологии сокращения // *Учёные записки РГГМУ*. 2019. № 54. С. 145–154. doi: 10.33933/2074-2762-2019-54-145-154
11. Дружинин П.В., Шкиперова Г.Т., Поташева О.В. Оценка влияния развития экономики на состояние окружающей среды и выбросы парниковых газов // *Дружковский вестник*. 2018. № 2. С. 203–215.
12. Leonov V.Ye., Serdyuk A.D. The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018. V. 10. No. 5. P. 1015–1024. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024
13. Носырев М.А., Комляшев Р.Б., Ильина С.И., Кабанов О.В. Очистка газовых выбросов от диоксида серы на промышленных предприятиях // *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 8. С. 24–27. doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-24-27
14. Газалеева Г.И., Дмитриева Е.Г., Демин А.И. Применение карбамидного метода для очистки отходящих агломерационных газов от диоксида серы // *Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2019. Т. 75. № 9. С. 1086–1092. doi: 10.32339/0135-5910-2019-9-1086-1091
15. Черемисина О.В., Пономарева М.А., Болотов В.А. Утилизация технологических газов перспективными сорбционными материалами // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2020. Т. 20. № 2. С. 93–100. doi: 10.14529/met200209
16. Masoud S.M., Vorobyeva D.V., Petropavlovskikh D.A., Bruneaub Ch., Osipov S.N. Fluorine-containing ruthenium-based olefin metathesis catalysts // *Russ. Chem. Rev.* 2021. V. 90. No. 4. P. 419–450. doi: 10.1070/RCR4984
17. Shokova E.A., Tafeenko V.A., Kovalev V.V. Trifluoroacetic anhydride as an activator in the acylation of aryl methyl ketones with carboxylic acids // *Russ. J. Org. Chem.* 2020. V. 56. No. 10. P. 1770–1774. doi: 10.1134/S1070428020100164
18. Abdollahi M., Larimi A., Jiang Z., Khorasheh F., Ghotbi C. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel over visible light-active Cu-impregnated carbon-doped TiO₂ // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 380. Article No. 134968. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134968
19. Kong Z., Xue Y., Hao T., Wu J., Zhang Y., Rong C., Chen H., Song L., Li D., Pan Y., Li Y. Carbon-neutral treatment of *N,N*-dimethylformamide-containing wastewater by up-flow anaerobic sludge blanket: CO₂ reduction and bio-energy cleaner production // *J. Clean. Prod.* 2022. V. 380. Article No. 134880. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134880
20. Abhishek K., Shrivastava A., Vimal V., Gupta A.K., Bhujbal S.K., Biswas J.K., Singh L.S., Ghosh P., Pandey A., Sharma P., Kumar M. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review // *Sci. Total*

Environ. 2022. V. 853. Article No. 158562. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158562

21. Ozcan M.C., Karaman B.P., Oktar N., Dogu T. Dimethyl ether from syngas and effect of CO₂ sorption on product distribution over a new bifunctional catalyst pair containing STA@SBA-15 // *Fuel*. 2022. V. 330. Article No. 125607. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125607

22. Ruan H., Wu S., Chen X., Zou J., Liao J., Cui H., Dong Y., Qiu Y., Shen J. Capturing CO₂ with NaOH solution from reject brine *via* an integrated technology based on bipolar membrane electrodialysis and hollow fiber membrane contactor // *Chem. Eng. J.* 2022. V. 450. Article No. 138095. doi: 10.1016/j.cej.2022.138095

23. Sooriyan S.K., Ibrahim N., Hanif M.A., Hasan M., Abdullah S., Adriansyah A.A., Setianto B., Syafiuddin A. Performance optimization of sulfur dioxide (SO₂) desulfurization by oil palm-based activated carbon using box-behnken design // *Biointerf. Res. Appl. Chem.* 2022. V. 12. No. 6. P. 7972–7982. doi: 10.33263/BRIAC126.79727982

24. Hu X., Bobbink F.D., van Muyden A., Talebi Amiri M., Bonnin A., Maréchal F., Nazeeruddin M.K., Qi Z., Dyson P.J. Cycloaddition of biogas-contained CO₂ into epoxides via ionic polymer catalysis: an experimental and process simulation study // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021. V. 60. No. 49. P. 17942–17948. doi: 10.1021/acs.iecr.1c03895

25. Alkhatib I.I.I., Khalifa O., Bahamon D., Abu-Zahra M.R.M., Vega L.F. Sustainability criteria as a game changer in the search for hybrid solvents for CO₂ and H₂S removal // *Sep. Purif. Technol.* 2021. V. 277. Article No. 119516. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119516

26. Vishnetskaya M.V., Mel'nikov M.Ya. Transformation of organic and inorganic compounds in trifluoroacetic acid // *Russ. J. Phys. Chem.* 2016. V. 90. No. 9. P. 1909–1911. doi: 10.1134/S0036024416090314

References

1. Gambhir A., Tavoni M. Direct air carbon capture and sequestration: how it works and how it could contribute to climate-change mitigation // *One Earth*. 2019. V. 1. No. 4. P. 405–409. doi: 10.1016/j.oneear.2019.11.006

2. Wu H., Chen W., Wu J., Zheng Z., Duan L. Synergistic removal of SO_x and NO_x in CO₂ compression and purification in oxy-fuel combustion power plant // *Energy Fuels*. 2019. V. 33. No. 12. P. 12621–12627. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b03284

3. Antonov K.L., Poddubny V.A., Markelov Yu.I., Buevich A.G., Medvedev A.N., Manzhurov I.L. Some results of greenhouse gases monitoring in the Arctic region of Russia // *Arctic: ecology and economy*. 2018. No. 1. P. 56–67 (in Russian). doi: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67

4. Eshmukhamedov M.A., Ponamaryova T.V., Raevskaya E.G. Purification of gas emissions from sulfur dioxide by means of activated granulated sorbent // *Chemical safety science*. 2020. V. 4. No. 1. P. 170–182 (in Russian). doi: 10.25514/CHS.2020.1.17012

5. Khairulin S.R., Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A., Salnikov A.V., Loginov L.I., Philippov A.G., Vildanov A.F., Mazgarov A.M. Carbon materials for cleaning gases from hydrogen sulfide and prospects for their use in base technologies for associated petroleum gas treatment // *Chemistry for sustainable development*. 2018. V. 26. No. 6. P. 679–689. doi: 10.15372/CSD820180615

6. Bellamy R., Geden O., Fridahl M., Cox E., Palmer J. Editorial: Governing carbon dioxide removal // *Front. Clim.* 2021. V. 3. Article No. 816346. doi: 10.3389/fclim.2021.816346

7. Moustakas N.G., Lorenz F., Dilla M., Peppel T., Strunk J. Pivotal role of holes in photocatalytic CO₂ reduction on TiO₂ // *Chemistry*. 2021. V. 27. No. 68. P. 17213–172196. doi: 10.1002/chem.202103070

8. Yu H.B., Huang J.H., Jiang L.B., Leng L.J., Yi K.X., Zhang W., Zhang C.Y., Yuan X.Z. *In situ* construction of Sn-doped structurally compatible heterojunction with enhanced interfacial electric field for photocatalytic pollutants removal and CO₂ reduction // *Appl. Catal. B: Environ.* 2021. V. 298. Article No. 120618. doi: 10.1016/j.apcatb.2021.120618

9. Shepelev I.I., Pilyaeva O.V., Eskova E.N., Kiryushin E.V. Solving the problems of cleaning gas emissions in alumina production // *Problems of regional ecology*. 2020. No. 1. P. 111–115 (in Russian). doi: 10.24411/1728-323X-2020-11111

10. Blinovskaya Ya.Yu., Mazlova E.A. Greenhouse gas emissions at coal production and processing: problem status and decrease technologies // *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019. No. 54. P. 145–154 (in Russian). doi: 10.33933/2074-2762-2019-54-145-154

11. Druzhinin P.V., Shkiperova G.T., Potasheva O.V. Evaluation of the impact of the development of economics on the state of the environment and greenhouse gas emissions // *Druckerovskij vestnik*. 2018. No. 2. P. 203–215 (in Russian).

12. Leonov V.Ye., Serdyuk A.D. The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants // *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2018. V. 10. No. 5. P. 1015–1024. doi: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024

13. Nosyrev M.A., Komlyashev R.B., Ilyina S.I., Kabanov O.V. Purification of gas emissions from sulfur dioxide at industrial plants // *Ecology and Industry of Russia*. 2018. V. 22. No. 8. P. 24–27 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-8-24-27

14. Gazaleeva G.I., Dmitrieva E.G., Demin A.I. Application of carbamid method for sintering off-gases cleaning of sulfur dioxide // *Ferrous Metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*. 2019. V. 75. No. 9. P. 1086–1092 (in Russian). doi: 10.32339/0135-5910-2019-9-1086-1091

15. Cheremisina O.V., Ponomareva M.A., Bolotov V.A. Utilization of technological gases by perspective sorption

materials // Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy. 2020. V. 20. No. 2. P. 93–100 (in Russian). doi: 10.14529/met200209

16. Masoud S.M., Vorobyeva D.V., Petropavlovskikh D.A., Bruneau Ch., Osipov S.N. Fluorine-containing ruthenium-based olefin metathesis catalysts // Russ. Chem. Rev. 2021. V. 90. No. 4. P. 419–450. doi: 10.1070/RCR4984

17. Shokova E.A., Tafeenko V.A., Kovalev V.V. Tri-fluoroacetic anhydride as an activator in the acylation of aryl methyl ketones with carboxylic acids // Russ. J. Org. Chem. 2020. V. 56. No. 10. P. 1770–1774. doi: 10.1134/S1070428020100164

18. Abdollahi M., Larimi A., Jiang Z., Khorasheh F., Ghotbi C. Photocatalytic oxidative desulfurization of model fuel over visible light-active Cu-impregnated carbon-doped TiO₂ // J. Clean. Prod. 2022. V. 380. Article No. 134968. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134968

19. Kong Z., Xue Y., Hao T., Wu J., Zhang Y., Rong C., Chen H., Song L., Li D., Pan Y., Li Y. Carbon-neutral treatment of *N,N*-dimethylformamide-containing wastewater by up-flow anaerobic sludge blanket: CO₂ reduction and bio-energy cleaner production // J. Clean. Prod. 2022. V. 380. Article No. 134880. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134880

20. Abhishek K., Shrivastava A., Vimal V., Gupta A.K., Bhujbal S.K., Biswas J.K., Singh L.S., Ghosh P., Pandey A., Sharma P., Kumar M. Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review // Sci. Total Environ. 2022. V. 853. Article No. 158562. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158562

21. Ozcan M.C., Karaman B.P., Oktar N., Dogu T. Dimethyl ether from syngas and effect of CO₂ sorption on

product distribution over a new bifunctional catalyst pair containing STA@SBA-15 // Fuel. 2022. V. 330. Article No. 125607. doi: 10.1016/j.fuel.2022.125607

22. Ruan H., Wu S., Chen X., Zou J., Liao J., Cui H., Dong Y., Qiu Y., Shen J. Capturing CO₂ with NaOH solution from reject brine *via* an integrated technology based on bipolar membrane electrodialysis and hollow fiber membrane contactor // Chem. Eng. J. 2022. V. 450. Article No. 138095. doi: 10.1016/j.cej.2022.138095

23. Sooriyan S.K., Ibrahim N., Hanif M.A., Hasan M., Abdullah S., Adriansyah A.A., Setianto B., Syafiuddin A. Performance optimization of sulfur dioxide (SO₂) desulfurization by oil palm-based activated carbon using box-behnken design // Biointerf. Res. Appl. Chem. 2022. V. 12. No. 6. P. 7972–798215. doi: 10.33263/BRIAC126.79727982

24. Hu X., Bobbink F.D., van Muyden A., Talebi Amiri M., Bonnin A., Maréchal F., Nazeeruddin M.K., Qi Z., Dyson P.J. Cycloaddition of biogas-contained CO₂ into epoxides via ionic polymer catalysis: an experimental and process simulation study // Ind. Eng. Chem. Res. 2021. V. 60. No. 49. P. 17942–17948. doi: 10.1021/acs.iecr.1c03895

25. Alkhatib I.I.I., Khalifa O., Bahamon D., Abu-Zahra M.R.M., Vega L.F. Sustainability criteria as a game changer in the search for hybrid solvents for CO₂ and H₂S removal // Sep. Purif. Technol. 2021. V. 277. Article No. 119516. doi: 10.1016/j.seppur.2021.119516

26. Vishnetskaya M.V., Mel'nikov M.Ya. Transformation of organic and inorganic compounds in trifluoroacetic acid // Russ. J. Phys. Chem. 2016. V. 90. No. 9. P. 1909–1911. doi: 10.1134/S0036024416090314

Эколого-экономическая эффективность малотоннажного производства метанола на основе газогенераторов синтез-газа

© 2026. А. М. Кузьмин^{1,2}, к. т. н., начальник учебно-методического управления, генеральный директор, Е. М. Гашевский³, старший преподаватель,

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. 8 н,

³Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, e-mail: kuzmin.lex@gmail.com, i@kuzminam.ru, em@gashevskiy.ru

Рассмотрена проблема обеспечения метанолом отдалённых нефтегазовых месторождений. Показано, что традиционная схема транспортировки сопряжена с высокими экологическими рисками, обусловленными возможными утечками и загрязнением окружающей среды. В качестве альтернативы предложено создание мобильных малотоннажных установок производства метанола на основе некаталитического парциального окисления метана в газогенераторе синтез-газа (ГСГ). Приведены результаты численного моделирования внутрикамерных процессов для производительности 5000 т метанола в год. Установлено, что оптимизация смесительной головки позволяет достичь полноты сгорания метана на уровне 99,2 % при отсутствии сажеобразования и минимальном остаточном содержании метана. На основе методологии оценки жизненного цикла (LCA) выполнен расчёт углеродного следа. Показано, что локальное производство метанола снижает удельные выбросы парниковых газов на 40–58 % по сравнению с централизованным производством и транспортировкой на расстояние от 2000–5000 км. Представлены результаты технико-экономической оценки для производительностей 2500–10000 т/год, включая показатели CAPEX, OPEX, себестоимости, IRR, NPV и срока окупаемости. Выполнен системный анализ экологических и технологических рисков внедрения ГСГ-установок, включая пожаро- и взрывоопасность, с обоснованием мер их минимизации. Сделан вывод о том, что внедрение ГСГ-установок существенно снижает экологическую нагрузку на труднодоступных территориях за счёт исключения дальних перевозок опасного груза и уменьшения эмиссии парниковых газов.

Ключевые слова: синтез-газ, метанол, малотоннажное производство, газогенератор, парциальное окисление, экологические риски, численное моделирование, выбросы, попутный нефтяной газ, углеродный след, масштабирование.

Environmental and economic efficiency of small-scale methanol production based on syngas generators

©2026. A. M. Kuzmin^{1,2}, ORCID: 0000-0003-0153-5683, E. M. Gashevskiy³, ORCID: 0000-0003-3919-954X

¹National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenina Ave., Tomsk, Russia, 634050, ²LLC "HTR",

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

³Baltic State Technical University "VOENMEH" named after D. F. Ustinov, 1, 1-ya Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, Russia, 190005, e-mail: kuzmin.lex@gmail.com, i@kuzminam.ru, em@gashevskiy.ru

The paper addresses the problem of methanol supply to remote oil and gas fields. It is shown that the traditional transportation scheme involves high environmental risks due to potential spills and pollution. As an alternative, the development of mobile small-scale methanol production units based on non-catalytic partial oxidation of methane in a syngas generator (SGG) is proposed. The results of numerical simulation of in-chamber processes for methanol capacity

of 5000 t/year are presented. It is established that optimization of the mixing head allows achieving methane combustion efficiency of 99.2 % without soot formation and with minimal residual methane. Based on life cycle assessment (LCA) methodology, the carbon footprint was calculated. It is shown that on-site methanol production reduces specific green house gas emissions by 40–58 % compared with centralized production and transportation over a distance of 2000–5000 km. The results of a techno-economic assessment for capacities of 2500–10000 t/year are presented, including CAPEX, OPEX, production cost, IRR, NPV and payback period. A systematic analysis of environmental and technological risks of SGG implementation, including fire and explosion hazards, with justification of mitigation measures, has been performed. It is concluded that the implementation of SGG-based units significantly reduces the environmental pressure in remote areas by eliminating long-distance hazardous cargo transportation and decreasing green house gas emissions.

Keywords: syngas, methanol, small-scale production, gas generator, partial oxidation, environmental risks, numerical simulation, emissions, associated petroleum gas, carbon footprint, scaling.

Метанол – один из наиболее востребованных химических продуктов; широко применяется как сырьё для производства формальдегида, уксусной кислоты, метил-трет-бутилового эфира, а также в качестве растворителя и противогидратной добавки при добыче углеводородов [1, 2]. На отдалённых нефтяных и газовых месторождениях, особенно в районах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, ежегодная потребность в метаноле достигает 10–20 тыс. т. Покрытие этой потребности традиционно осуществляется двумя способами: централизованная доставка готового продукта с крупных заводов либо организация производства непосредственно на месте.

Первый способ, несмотря на кажущуюся простоту, связан с серьёзными экологическими издержками. Транспортировка метанола, особенно в условиях сурового климата и слаборазвитой инфраструктуры, увеличивает вероятность аварийных разливов, утечек и загрязнения почвы и водоёмов [3]. Кроме того, дальние перевозки повышают стоимость конечного продукта в 2–5 раз и сопровождаются значительными энергозатратами. Второй способ – локальное производство – в последние годы привлекает всё больше внимания, поскольку позволяет исключить транспортные риски и гибко реагировать на изменение спроса.

Однако существующие технологии получения метанола, основанные на паровом риформинге метана (SMR), являются крупнотоннажными (от 1 млн т/год и выше) и не поддаются масштабированию вниз без потери экономической эффективности [4]. Альтернативой служит процесс некаталитического парциального окисления (ПОХ) природного газа с получением синтез-газа (смеси CO и H₂) с последующим каталитическим синтезом метанола. Ранее авторами было показано [5], что использование газогенераторов, спроектированных по принципу камер жидкостных ракетных двигателей, позволяет достигать давления синтез-газа до 8 МПа и полностью

отказаться от кислородных станций, применяя в качестве окислителя атмосферный воздух. Такой подход даёт возможность создавать компактные модульные установки производительностью от 1000 до 10000 т в год [5].

Оценки глобального климатического эффекта метана неоднозначны. Согласно альтернативным расчётам, вклад CH₄ в общий парниковый эффект составляет лишь около 0,81 %, и даже полное прекращение всех антропогенных выбросов метана привело бы к снижению глобальной температуры менее чем на 0,04 °C [6]. Поэтому при обсуждении утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) акцент должен смещаться с глобального потепления на локальные экологические выгоды: предотвращение загрязнения воздуха сажей, снижение рисков разливов опасных грузов и сокращение потребности в катализаторах.

Цель исследования состоит в проведении количественного анализа экологической эффективности малотоннажного производства метанола на базе газогенератора синтез-газа по сравнению с традиционной схемой транспортировки для диапазона производительностей 2500–10000 т/год, включая расчёт углеродного следа, энергетического КПД и предотвращённых выбросов при утилизации ПНГ, а также технико-экономических показателей (CAPEX, OPEX, себестоимость, IRR, NPV, срок окупаемости) на основе численного моделирования внутрикамерных процессов и ранее опубликованных данных по экономической оценке.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является газогенератор синтез-газа (ГСГ) – центральный узел мобильной установки производства метанола (рис. 1).

В работе рассмотрены производительности 2500, 5000, 7500 и 10000 т/год. Газогенератор синтез-газа включает четыре основных узла: смесительную головку, камеру сгорания, узел

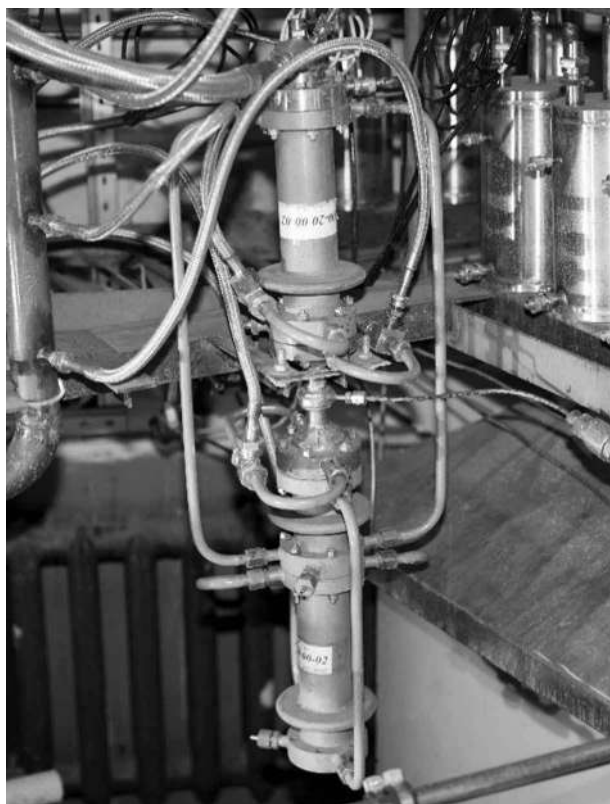
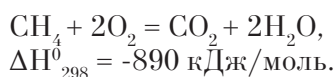
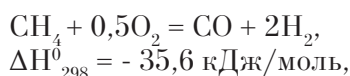


Рис. 1. Газогенератор синтез-газа (производительность 150 нм³/час)
Fig. 1. Syngas generator (capacity 150 nm³/h)

впрыска воды и испарительную камеру. Принцип работы основан на некаталитическом парциальном окислении метана воздухом по суммарным реакциям:



В качестве горючего используется природный газ (в составе 95 % CH₄, остальное – C₂H₆, C₃H₈, N₂, CO₂), в качестве окислителя – атмосферный воздух. Для регулирования температуры и состава синтез-газа в испарительную камеру подаётся вода.

Как было отмечено в работе [5], оптимизация состава синтез-газа по модулю $M = (\text{H}_2 - \text{CO}_2) / (\text{CO} + \text{CO}_2)$ в диапазоне 2,0–2,3 позволяет повысить выход метанола на 8–12 %, а предложенная схема энергетической интеграции с турбогенератором увеличивает общий КПД комплекса до 68 %. В настоящей работе для базового режима (5000 т/год метанола) приняты следующие расходные параметры: расход метана

0,20 кг/с, расход воздуха 1,159 кг/с, расход воды в узел впрыска 0,19 кг/с. Давление в камере сгорания 6 МПа, температура на выходе из камеры – около 1200 °С. Для других производительностей расходы масштабируются линейно.

На основании численных исследований выбрана оптимальная конфигурация смесительной головки: центробежная форсунка для окислителя с шестью тангенциальными входами ($D_{\text{вх}} = 37,2$ мм, $d_{\text{вх}} = 6,6$ мм) и шесть струйных форсунок для горючего ($d_c = 2,9$ мм), расположенных по окружности и направленных под углом 45° к оси внутрь полости окислителя. Геометрические параметры камеры сгорания масштабируются согласно критерию подобия: $L_{\text{кв}} = 3,33 \cdot D_{\text{кв}}$, $D_{\text{кв}}$ пропорционален корню квадратному из расхода.

Для определения состава продуктов и полноты сгорания проведено численное моделирование в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности [7] и модели распада вихря (EDM) для турбулентного горения [8, 9]. Для моделирования турбулентного горения выбрана модель EDM, поскольку при высоких температурах (>1200 °С) скорость химических реакций лимитируется турбулентным смешением, а не собственно кинетикой. Это допущение подтверждено валидацией модели [10]. Использование более детальной модели EDC (Eddy Dissipation Concept) с подробными механизмами (например, GRI 3.0, содержащим более 300 реакций) потребовало бы значительно больших вычислительных затрат, особенно при проведении многовариантных параметрических исследований. Для целей данной работы такое усложнение модели является нецелесообразным. Таким образом, использование EDM представляет собой оправданный компромисс между точностью и вычислительной эффективностью, позволяющий получить надёжные результаты для расчёта КПД и оценки выбросов при решении прикладной инженерной задачи. Моделирование выполнено для стационарного режима при заданных выше расходных и температурных параметрах. Результаты моделирования (поля температур, концентраций) использованы для расчёта энергетического КПД и оценки выбросов. Валидация принятой физико-математической модели проведена в работе [10], где показано удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных по составу продуктов парциального окисления метана.

Методика оценки экологических показателей. Для количественной оценки экологической эффективности использован комплекс взаимодополняющих методик: оценка углеродного следа по методологии Life Cycle Assessment (LCA), расчёт глобального потенциала потепления (GWP) по методике IPCC и определение энергетического КПД установки.

Выбор LCA в постановке «cradle-to-gate» обусловлен тем, что стадии использования и утилизации метанола являются общими для обоих сравниваемых сценариев и не влияют на сравнительную оценку. В российской практике расчёты углеродного следа регулируются Приказом Минприроды России от 27.05.2022 № 371 «Об утверждении методик количественного определения объёмов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов». Как показано в обзоре [11], методика, утверждённая Приказом № 371, оперирует категориями Score 1–3, аналогичными GHG Protocol, что обеспечивает совместимость нашей оценки с международными стандартами (ISO 14064, ISO 14067). В работе использован 100-летний горизонт GWP_{100} как наиболее распространённый в нормативной практике.

Энергетический КПД определён по низшей теплоте сгорания (LHV), что является стандартом для газовых и нефтехимических процессов и точнее отражает полезно используемую энергию, поскольку теплота конденсации водяного пара не утилизируется. Значение КПД процесса парциального окисления (78 %) рассчитано как отношение энтальпии продуктов (синтез-газа) к энтальпии исходных компонентов (метан + воздух). Это значение достигается за счёт: 1) экзотермичности реакций парциального окисления (не требуется внешний подогрев, в отличие от SMR); 2) рекуперации тепла отходящих газов для подогрева исходных компонентов; 3) энергетической интеграции с турбогенератором (общий КПД комплекса до 68 %). Это на 12–15 процентных пунктов выше типичного КПД парового риформинга (63–66 %) [12], где основная потеря энергии связана с необходимостью внешнего подогрева реактора и более высоким расходом топлива.

Обоснование диапазонов значений коэффициентов выбросов. Диапазоны значений коэффициентов выброса для сценариев SMR и POX определены на основе анализа литературных данных и отражают естественную вариабельность технологических параметров: для SMR (0,68–1,08 т CO_2 -экв/т метанола): диапазон определён по данным работы [12],

где проведено сравнение климатического воздействия различных процессов производства метанола в Европе. Нижняя граница соответствует высокоэффективным установкам с полной рекуперацией тепла, верхняя – для установок с более низкой эффективностью и использованием электроэнергии из угольных источников. Для POX (0,35–0,45 т CO_2 -экв/т метанола): диапазон определён на основе систематического обзора [13], где показано, что некаталитическое парциальное окисление обеспечивает низкие выбросы благодаря экзотермичности процесса. Дополнительно, в работе [14] для аналогичных систем получены значения около 0,4 т CO_2 -экв/т, что подтверждает указанный интервал. Транспортная составляющая (0,156 т CO_2 /т метанола на 2000 км): рассчитана как средневзвешенное для смешанной транспортировки (70 % железнодорожный транспорт, 30 % – автомобильный) с коэффициентами $\epsilon_{жд} = 0,06$ и $\epsilon_{авто} = 0,12$ кг CO_2 /(т·км), взятыми из работы [15].

Расчётные формулы. Интегральный показатель углеродного следа CF (кг CO_2 -экв/т метанола) рассчитывается по формуле:

$$CF = \sum_{i=1}^n (EF_i \cdot M_i) + CF_{транспорт} \quad (1)$$

где EF_i – коэффициент выбросов для i -го источника (кг CO_2 -экв/ед. активности); M_i – количество i -го ресурса или объём i -го процесса; $CF_{транспорт}$ – выбросы, связанные с транспортировкой.

Транспортная составляющая:

$$CF_{транспорт} = L \cdot \epsilon_{сред}, \quad (2)$$

где $L = 2000$ км (расстояние транспортировки); $\epsilon_{сред} = 0,078$ кг CO_2 /(т·км).

Эмиссия CO_2 -эквивалента от остаточного метана оценивается как:

$$E_{CH_4, CO_2-экв} = \dot{m}_{CH_4} \cdot GWP_{100} \quad (3)$$

где $GWP_{100} = 29,8$ кг CO_2 -экв/кг CH_4 согласно IPCCAR6 [16].

Методика технико-экономической оценки. Для оценки экономической эффективности установок использован метод дисконтированных денежных потоков [20, 21], позволяющий рассчитать доходность вложений в проект с учётом затрат, выручки от реализации продукции, рыночной ставки доходности и инфляции. В модели учтены: прогнозная цена на метанол, влияние экологического законодательства (включая штрафы за сжигание ПНГ),

инженерные изыскания и проектирование, поставка аппаратов комплекса производства синтез-газа, доставка и пуско-наладка оборудования. Основными расчётными показателями проекта являются: внутренняя норма доходности (IRR), дисконтированный срок окупаемости (DPP), индекс прибыльности (PI), чистая приведённая стоимость (NPV). Валюта расчёта – доллар США (USD). Расчёты выполнены на основе общепринятых принципов экономической оценки инвестиционных проектов [20, 21].

Результаты и обсуждение

Экологические риски транспортировки метанола. Метанол относится к классу опасных грузов (класс 3 – легковоспламеняющиеся жидкости, ЛВЖ). При перевозке железнодорожными цистернами или автоцистернами на дальние расстояния (2000–5000 км) возможны аварии с разливом, возгоранием и загрязнением окружающей среды. Согласно данным Федеральной службы по надзору в сфере транспорта (Ространснадзор), в 2024 г. на сети железных дорог РФ зафиксировано 59 происшествий при перевозке опасных грузов; причины – течь из сливного прибора (46 случаев), дефект котла (7), задымление груза (2), прочие причины (4). В Сибирском федеральном округе этот показатель составил 84 происшествия (течь из сливного прибора – 55, дефект котла – 11, через аппаратуру котла – 1, прочие – 17). За три квартала 2024 г. на полигонах Октябрьской и Северной железных дорог допущено 33 события, связанных с нарушением правил безопасности при перевозке опасных грузов (в 2023 г. – 21). Для отдалённых месторождений, где дороги часто грунтовые, а климатические условия экстремальны, риски возрастают.

Экономические потери от аварий с разливом метанола могут составлять от нескольких миллионов до десятков миллионов рублей. Так, при разливе 13 т метанола в Ямало-Ненецком автономном округе ущерб окружающей среде был оценён в 1,257 млн руб., а на компанию была возложена обязанность по проведению полной рекультивации загрязнённого участка площадью 873 м². Экологический ущерб (восстановление почв, очистка воды) может многократно превышать прямые потери, особенно в условиях отдалённых и труднодоступных районов, где проведение рекультивационных работ осложнено. Метанол токсичен для человека

и водных организмов: Высокая токсичность метанола и его способность накапливаться в организме обуславливают необходимость тщательного контроля, как при транспортировке, так и при производстве. Как показано в работе [17], нефтесодержащие отходы на территории месторождений создают комплексное загрязнение почв, поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха, поэтому внедрение любых новых производств должно сопровождаться организацией многокомпонентного мониторинга, включающего не только контроль выбросов самой установки, но и оценку состояния прилегающих экосистем методами биотестирования и химического анализа. Особенно остро экологические риски стоят при транспортировке вблизи особо охраняемых природных территорий, рыбохозяйственных объектов или в хрупких северных экосистемах.

При сопоставлении двух альтернатив, транспортировки метанола на дальние расстояния и его производства непосредственно на месторождении, локальное производство позволяет существенно снизить экологические риски, связанные с транспортными авариями и разливами. Однако при этом необходимо учитывать, что само производство метанола требует строгого соблюдения природоохранных требований, включая организацию многокомпонентного мониторинга [17], контроль выбросов и утилизацию отходов. С учётом этих мер локальное производство представляет собой экологически более безопасную альтернативу по сравнению с транспортировкой на расстояние 2000–5000 км.

Оценка экологических и технологических рисков при внедрении ГСГ-установок. Внедрение ГСГ-установок, как и любого промышленного объекта, сопряжено с определёнными рисками, которые были систематизированы по трём категориям.

Экологические риски связаны с возможными аварийными выбросами в атмосферу, разливами жидких продуктов (метанол, вода) и загрязнением почв. В предлагаемой схеме эти риски минимизируются за счёт: полного исключения транспортировки метанола как опасного груза класса 3 – основного источника экологических аварий в традиционной схеме; герметичности всех технологических коммуникаций, выполненных по классу взрывозащиты; наличия систем аварийного сброса и локализации разливов.

Технологические риски включают отказы оборудования (форсунок, насосов, арматуры), нарушение режимов работы (отклонение

температуры, давления, соотношения компонентов) и образование сажи. Для их минимизации: смесительная головка спроектирована с обеспечением устойчивого вихревого течения, предотвращающего образование застойных зон и локальных обеднённых участков, что подтверждено численным моделированием (отсутствие сажеобразования); все критичные параметры контролируются автоматической системой управления в реальном времени; предусмотрено резервирование ключевых узлов. Пожаро- и взрывоопасность – ключевой риск при работе с углеводородными газами и кислородом/воздухом под давлением. Малотоннажный комплекс метанола и все обеспечивающие системы выполнены в пожаровзрывобезопасном исполнении. Ключевая особенность – быстрое, менее 30 с, аварийное отключение системы за счёт работы быстродействующих отсечных клапанов и автоматической системы защиты. Время выхода на режим или полной остановки процесса не превышает десятков секунд, что кардинально снижает риски развития аварийной ситуации. Все узлы, работающие под давлением, снабжены предохранительными клапанами и системами сброса давления. Кроме того, использование воздуха вместо чистого кислорода в качестве окислителя существенно снижает пожаро- и взрывоопасность по сравнению с альтернативными схемами, применяющими кислородное дутьё.

Риски загрязнения почв и водоёмов при длительной эксплуатации: модульная конструкция установки на раме исключает необходимость в капитальных сооружениях (фундаменты, заглублённые коммуникации). После отработки запасов оборудование может быть демонтировано в течение нескольких недель без нанесения долговременного ущерба окружающей среде. В соответствии с рекомендациями [17], для площадок размещения малотоннажных производств разрабатывается программа комплексного экологического мониторинга, включающая контроль состояния почв, водных объектов и атмосферного воздуха на всех этапах жизненного цикла установки.

Определение состава продуктов и полноты сгорания газогенератора. Результаты численного моделирования представлены на рисунках 2 и 3. Зона максимальных температур ($\approx 2000^\circ\text{C}$) локализована вблизи смесительной головки. К выходу из камеры температура выравнивается до $\sim 1210^\circ\text{C}$, что согласуется с данными термодинамических расчётов. Отсутствуют локальные перегревы стенок

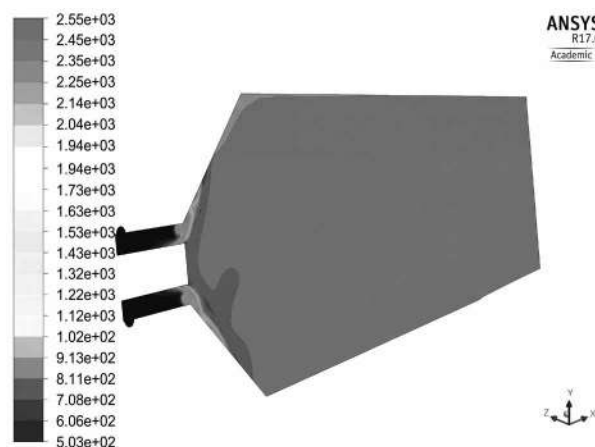


Рис. 2. Распределение температуры по сечению камеры сгорания газогенератора

Fig. 2. Temperature distribution across the combustion chamber cross-section of the gas generator

(максимум 1820°C), что снижает тепловое напряжение и продлевает ресурс оборудования.

Метан практически полностью выгорает на длине ≈ 30 мм от входа в камеру сгорания (рис. 3). Полнота сгорания достигает 99,2 %, массовая доля CO на выходе – 17,7 % (в пересчёте на сухой газ), содержание CO_2 – 3,2 %. По результатам численного моделирования, сажеобразование не обнаружено (концентрация твёрдых частиц углерода во всех расчётных областях находится ниже предела обнаружения модели, составляющего 10^{-6} по массовой доле), что подтверждает корректность выбранной конструкции смесительной головки, предотвращающей образование застойных зон и локальных обеднённых участков.

Отсутствие сажеобразования согласуется с результатами работы [19] и позволяет исключить эмиссию чёрного углерода – одного из наиболее опасных короткоживущих климатических загрязнителей [16]. Также в дальнейшем эти результаты были подтверждены на практике при проведении экспериментальных исследований на стендах и при отработке технологии на опытно-демонстрационной установке.

В таблице 1 приведён состав синтез-газа на выходе из ГСГ после испарительной камеры. Отношение $\text{H}_2/\text{CO} = 1,70$, что после корректировки в испарительной камере повышается до 1,81 и соответствует оптимальному для синтеза метанола диапазону 1,8–2,1. Состав не зависит от производительности, поскольку масштабирование сохраняет гидродинамическое подобие.

Регулирование состава синтез-газа и материальный баланс. Механизм регулирования состава синтез-газа: основным интегральным

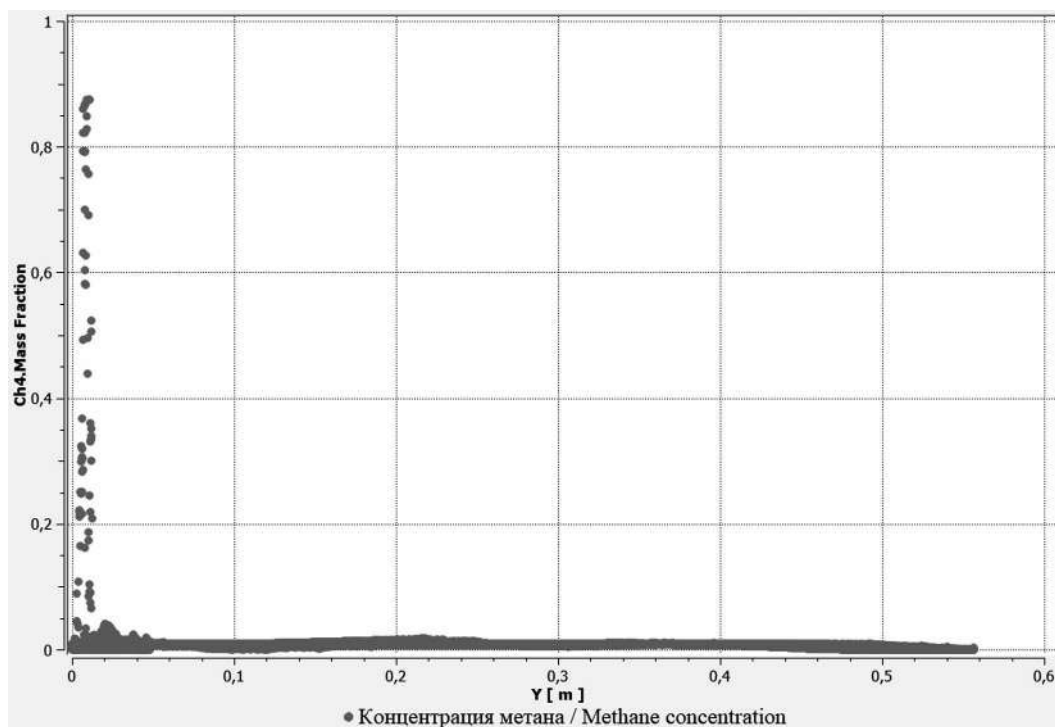


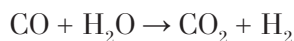
Рис. 3. Концентрация метана по длине камеры сгорания
Fig. 3. Methane concentration along the length of the combustion chamber

Таблица 1 / Table 1
Состав синтез-газа на выходе из ГСГ / Synthesis gas composition at the gas generator outlet

Компонент / Component	Мольная доля / Molar fraction	Массовая доля / Mass fraction
N ₂	0,4848	0,6466
H ₂	0,2424	0,0233
CO	0,1426	0,1902
H ₂ O	0,1071	0,0918
CO ₂	0,0228	0,0479
CH ₄	0,0002	0,0002

показателем качества синтез-газа при синтезе метанола является стехиометрическое соотношение компонентов – так называемый модуль синтез-газа: $M = (H_2 - CO_2) / (CO + CO_2)$. Оптимальное значение модуля лежит в диапазоне 2,0–2,3 [18, 22, 23]. Одновременно должны выполняться и другие важные условия: отношение H_2/CO должно быть больше 2,1, а концентрация CO_2 – не менее 0,5 % об. [22].

Регулирование состава синтез-газа до целевых значений осуществляется за счёт изменения расхода воды, впрыскиваемой в испарительную камеру. Вода испаряется и вступает в реакцию паровой конверсии CO:



Эта реакция позволяет увеличить содержание водорода и скорректировать модуль

синтез-газа до целевого диапазона 2,0–2,3. Для базового режима (5000 т/год метанола) материальный баланс имеет следующие параметры (табл. 2).

При указанных расходах достигается модуль $M = 2,1$, что соответствует оптимальному для синтеза метанола диапазону. Отклонение модуля от оптимальных значений (в частности, выход за пределы диапазона 2,0–2,3) приводит к снижению выхода метанола, как показано в работе [23].

Оценка углеродного следа и масштабирование. На основании полученных данных проведена количественная оценка углеродного следа (табл. 3). Удельные выбросы не зависят от масштаба, поэтому абсолютные выбросы масштабируются линейно.

Таким образом, снижение углеродного следа при переходе на ГСГ составляет 40–58 %

Таблица 2 / Table2

Материальный баланс базового режима (5000 т метанола/год)
Material balance of the base line mode (methanol 5000 t/year)

Поток Stream	Расход, кг/с Flow rate, kg/s	Компоненты Components
Метан (горючее) / Methane (fuel)	0,20	CH ₄ – 95 %, C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , N ₂ , CO ₂ – 5 %
Воздух (окислитель) / Air (oxidizer)	1,159	O ₂ – 23,2 %, N ₂ – 76,8 %
Вода (впрыск) / Water (injection)	0,19	H ₂ O
Синтез-газ на выходе / Syngas outlet	1,549	см. табл. 1 / see table 1 for composition

Таблица 3 / Table 3

Удельный углеродный след, т CO₂-экв/т метанола (для всех производительностей)
Specific carbon footprint, t CO₂-eq/t of methanol (for all production rates)

Сценарий / Scenario	Scope 1	Scope 2	Scope 3	Транспорт Transport	Итого Total
SMR(базовый) / SMR (baseline)	0,45–0,65	0,15–0,25	0,08–0,18	–	0,68–1,08
SMR + транспорт (2000 км, смешанный) SMR + transport (2000 km, mixed)	0,45–0,65	0,15–0,25	0,08–0,18	0,156	0,84–1,24
POX(ГЦГ) / POX (SGG)	0,20–0,25	0,08–0,12	0,07–0,08	0	0,35–0,45

Примечание: сценарий SMR (базовый) не учитывает транспортную составляющую, поскольку рассматривается только производство метанола без доставки к месту потребления.
Note: the SMR (baseline) scenario does not include the transport component, as it considers methanol production only, without delivery to the point of consumption.

Таблица 4 / Table 4

Абсолютные выбросы парниковых газов для разных производительностей
с указанием диапазонов снижения при переходе на ГЦГ / Absolute green house gas emissions
for different production capacities with the reduction ranges indicated for the transition to the SGG

Производи- тельность, т/год Capacity, t/year	SMR + транспорт (0,84– 1,24 т/т) / SMR + transport (0.84–1.24 t/t)	POX (ГЦГ) (0,35–0,45 т/т) POX (SGG) (0.35–0.45 t/t)	Снижение / Reduction	
			т/год t/year	%
2500	2100–3100	875–1125	1225–1975	40–58
5000	4200–6200	1750–2250	2450–3950	40–58
7500	6300–9300	2625–3375	3675–5925	40–58
10000	8400–12400	3500–4500	4900–7900	40–58

для всех производительностей. Для установки 10000 т/год экономия достигает 4900–7900 т CO₂-экв/год, что эквивалентно выбросам ~800–1300 легковых автомобилей в год.

Эти результаты согласуются с выводами [14], где показано, что использование альтернативных методов производства метанола позволяет существенно снизить парниковые выбросы по сравнению с традиционным производством из природного газа, главным образом за счёт предотвращённых выбросов при переработке отходов. В работе [14] также показано, что комбинирование сухого риформинга и парциального окисления метана позволяет достичь снижения выбросов CO₂.

Предотвращённые выбросы от утилизации ПНГ. Для производства метанола используется ПНГ, который в противном случае сжигается на факелах. При сжигании 1 м³ ПНГ (содержание CH₄ ~85 %) образуется около

1,85 кг CO₂ [15]. Расход ПНГ пропорционален производительности (табл. 5).

Технико-экономическая оценка малотоннажных установок. На основе ранее опубликованных данных [20, 21] выполнена оценка для установок производительностью 5000, 10000 и 20000 т/год (табл. 6). Удельные инвестиционные затраты составляют 691–792 USD/т годовой производительности; себестоимость метанола оценивается в диапазоне 220–320 USD/т. Основной вклад в конкурентоспособность вносит исключение логистических издержек, которые, по оценкам экспертов [21], увеличивают стоимость завозного метанола на 150–200 % по сравнению с ценой на условиях франко-склад производителя по состоянию на 2024 г. Таким образом, локальное производство остаётся экономически предпочтительным по сравнению с транспортировкой готового продукта на расстояние 2000–5000 км.

Таблица 5 / Table 5

Предотвращённые выбросы от утилизации ПНГ
Avoided emissions from the utilization of associated petroleum gas (APG)

Производительность метанола, т/год Methanol production capacity, t/year	Потребление ПНГ, млн. м³/год APG consumption, million m³/year	Предотвращённые выбросы, тыс. т CO ₂ /год Avoided emissions, ·10 ³ t CO ₂ /year
2500	2,25	4,2
5000	4,50	8,3
7500	6,75	12,5
10000	9,00	16,7

Таблица 6 / Table 6

Сравнительная оценка экологических показателей для различных производительностей
Comparative assessment of environmental indicators for different production rates

Показатель / Indicator	Производительность, т/год / Capacity, t/year			
	2500	5000	7500	10000
Углеродный след (удельный), т CO ₂ -экв/т / Carbon footprint (specific), t CO ₂ -eq/t				
SMR + транспорт SMR + transport	0,84–1,24	0,84–1,24	0,84–1,24	0,84–1,24
POX (ГСГ) / POX (SGG)	0,35–0,45	0,35–0,45	0,35–0,45	0,35–0,45
Углеродный след (абсолютный), т CO ₂ -экв/год / Carbon footprint (absolute), t CO ₂ -eq/year				
SMR + транспорт SMR + transport.	2100–3100	4200–6200	6300–9300	8400–12400
POX (ГСГ) / POX (SGG)	875–1125	1750–2250	2625–3375	3500–4500
Предотвращённые выбросы от утилизации ПНГ, тыс. т CO ₂ /год Avoided emissions from APG utilization, thousand t CO ₂ /year	4,2	8,3	12,5	16,7
Энергетический КПД, % / Energy efficiency, %				
SMR	63–66	63–66	63–66	63–66
POX (ГСГ) / POX (SGG)	78	78	78	78
Время запуска / остановка SMR POX / Start-up/shutdown time	часы / 30 с hours / 30 s	часы / 30 с hours / 30 s	часы / 30 с hours / 30 s	часы / 30 с hours / 30 s
Удельные инвестиции (CAPEX), USD/т Specific investments, USD/t	~800	~792	~740	~700
Себестоимость продукта (средняя), USD/т / Product cost (average), USD/t	280–320	260–300	240–280	220–260

Сопоставление результатов с технологией парового риформинга выявляет несколько существенных экологических преимуществ парциального окисления: отсутствие внешнего подогрева снижает косвенные выбросы, высокое давление (6 МПа) исключает энергоёмкое компримирование синтез-газа, а модульная архитектура позволяет избежать долговременного загрязнения почвы после выработки месторождения.

Обсуждение неопределённостей. Основной вклад в разброс значений вносит вариабельность эмиссионных коэффициентов, обусловленная региональными особенностями структуры энергоснабжения и конкретными технологическими решениями. Для парового

риформинга ключевыми факторами изменчивости служат эффективность теплообменного оборудования, тип используемого топлива для нагрева реактора и доля угольной или возобновляемой генерации в местной энергосистеме. Для парциального окисления, в условиях принятого допущения о постоянстве состава исходного газа, основной вклад в неопределённость вносят вариации коэффициентов выбросов для Scope 2 (электроэнергия) и эффективность утилизации тепла.

В реальных условиях ПНГ требует предварительной подготовки – осушки, очистки от сернистых соединений и, при необходимости, фракционирования для разделения на лёгкие (C₁–C₂) и тяжёлые (C₃⁺) фракции. Вопросы

комплексной переработки ПНГ, включая вовлечение тяжёлых углеводородов в получение ароматических углеводородов и компонентов моторных топлив, рассматриваются в работах [24, 25]. Неопределённости, связанные с составом реального ПНГ (содержание тяжёлых углеводородов, сернистых соединений и влаги) и режимами его подготовки, требуют отдельного исследования и не учитывались в настоящей работе. Тем не менее, даже при учёте этих факторов, полученное снижение углеродного следа не опускается ниже 40 % во всём исследованном диапазоне производительностей, что свидетельствует о безусловной экологической целесообразности рассматриваемого подхода.

Перспективным направлением развития технологии является переход к производству «голубого» метанола – с дополнительным улавливанием и утилизацией CO_2 , что позволит ещё более значительно сократить углеродный след. Следует подчеркнуть, что экологическая ценность предложенной технологии не ограничивается каким-либо одним аспектом, а проявляется на двух уровнях. На глобальном уровне предлагаемая технология обеспечивает снижение удельных выбросов парниковых газов на 40–58 % по сравнению с традиционной схемой централизованного производства метанола и его транспортиров-

ки на расстояние 2000–5000 км. Основной вклад в это снижение вносят исключение транспортной составляющей, более высокий энергетический КПД процесса парциального окисления (78 % против 63–66 % у парового риформинга) и утилизация ПНГ, который в противном случае сжигается на факелах. На локальном уровне достигается существенное улучшение качества окружающей среды в районах нефтегазодобычи: ликвидируется факельное сжигание ПНГ с выбросами сажи, оксидов азота и серы; исключаются риски транспортных аварий с разливами метанола; сокращается объём образования твёрдых отходов благодаря использованию некаталитического процесса на стадии получения синтез-газа (катализаторы применяются только на последующей стадии каталитического синтеза метанола из CO и H_2 , однако их общий расход и объём утилизируемых отходов ниже, чем в традиционной схеме парового риформинга, где катализатор используется также на стадии конверсии). Таким образом, рассматриваемая технология представляет собой комплексное решение, сочетающее вклад в смягчение антропогенного воздействия на климат с непосредственным улучшением экологической обстановки в регионах добычи углеводородов.

Разработанная технология ГСГ (рис. 4) может служить основой для создания распре-

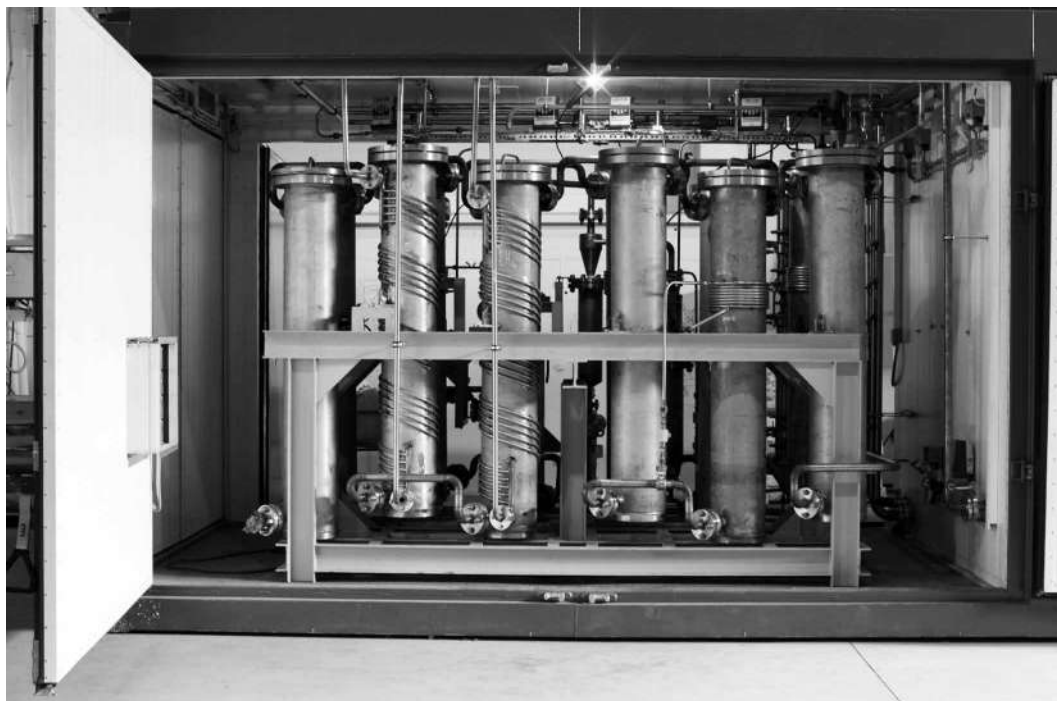


Рис. 4. Блок генерации и подготовки синтез-газа 300 $\text{nm}^3/\text{час}$ заданного состава (ОДУ-300) / **Fig. 4.** Synthesis gas generation and conditioning unit (SGU-300) with a capacity of 300 nm^3/h of specified composition

делённых производств «голубого» метанола с низким углеродным следом, что особенно актуально в контексте перехода к низкоуглеродной экономике и утилизации ПНГ.

Ранее аналогичный подход был предложен авторами для производства «голубого» водорода на базе того же типа газогенераторов синтез-газа; настоящая работа расширяет этот подход на метанол, который является более удобным для хранения и транспортировки жидким энергоносителем.

Заключение

Выполненное исследование подтверждает высокую экологическую эффективность малотоннажного производства метанола с использованием газогенератора на основе некаталитического парциального окисления метана. Установлено, что замена традиционной схемы централизованного производства с транспортировкой на локальное производство позволяет достичь полноты сгорания метана 99,2 % при содержании остаточного CH_4 в продуктах не более 0,02 мол. %, что практически исключает эмиссию несгоревшего метана и сажи. Энергетический КПД ГСГ составляет 78 %, что на 12–15 процентных пунктов выше, чем у парового риформинга. Удельный углеродный след метанола, произведённого на ГСГ, составляет 0,35–0,45 т CO_2 -экв/т, что на 40–58 % ниже, чем при традиционной схеме с транспортировкой на расстояние 2000 км. Предотвращённые выбросы от утилизации ПНГ достигают 16,7 тыс. т CO_2 в год для установки производительностью 10000 т/год.

Вместе с тем, объективная оценка экологической эффективности требует учёта потенциальных рисков, связанных с эксплуатацией ГСГ-установок в удалённых и труднодоступных районах. Основные из них – пожароопасность процесса, обусловленная использованием метана и высокотемпературным режимом работы реактора (до 1200 °C), а также возможность аварийных ситуаций с выбросом опасных веществ. Ликвидация последствий таких аварий в условиях отсутствия развитой инфраструктуры и удалённости от специализированных подразделений МЧС значительно усложнена по сравнению с промышленно развитыми регионами. Поэтому при внедрении малотоннажных производств необходима разработка и реализация комплекса организационно-технических мероприятий, включающих системы автоматического контроля и противоаварийной защиты,

резервирование систем безопасности, а также создание локальных аварийно-спасательных формирований и планов ликвидации аварий, адаптированных к условиям конкретных месторождений. Как рекомендовано в работе [17], требуется организация многокомпонентного экологического мониторинга площадок размещения установок, включающего контроль состояния почв, водных объектов и атмосферного воздуха.

Предложенная технология представляет собой экологически и энергетически обоснованную альтернативу традиционной схеме транспортировки метанола, однако её внедрение должно сопровождаться системным подходом к управлению экологическими рисками. Результаты масштабирования подтверждают сохранение экологических преимуществ во всём рассмотренном диапазоне производительностей (2500–10000 т/год), что открывает перспективы для промышленного внедрения на малых и средних месторождениях при условии реализации необходимых мер по обеспечению промышленной и экологической безопасности.

Литература

1. Кемалов Р.А., Кемалов А.Ф. Технологии получения и применения метанола. Казань: Казан. ун-т, 2016. 167 с.
2. Арутюнов В.С., Голубева И.А., Елисеев О.Л., Жагфаров Ф.Г. Технология переработки углеводородных газов. М.: Юрайт, 2020. 723 с.
3. Арутюнов В.С. Окислительная конверсия природного газа. М.: Красанд, 2011. 590 с.
4. Magson J., Lee Chan T.G., Mohammed A., Ward K. Towards flexible large-scale, environmentally sustainable methanol and ammonia co-production using industrial symbiosis // RSC Sustainability. 2025. V. 3. No. 3. P. 1157–1169. doi: 10.1039/d4su00647j
5. Кузьмин А.М. Попутный нефтяной газ в метанол: экологические последствия факельного сжигания и перспективы низкоуглеродной энергетики (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2026. № 2. С. 29–39. doi: 10.25750/1995-4301-2026-2-029-039
6. Кантор Г.Я., Сырчина Н.В. Альтернативная оценка вклада метана в парниковый эффект // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 3. С. 197–207. doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-197-207
7. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 1974. V. 3. No. 2. P. 269–289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2
8. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symp. Combust.

Proc. 1977. V. 16. No. 1. P. 719–729. doi:10.1016/S0082-0784(77)80366-4

9. Bouziane A., Alami A., Zaitri M., Bouchame B., Bouchetara M. Investigation of swirl stabilized CH₄ air flame with varied hydrogen content by using computational fluid dynamics (CFD) to study the temperature field and flame shape // Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 2021. V. 11. No. 2. P. 6943–6948. doi: 10.48084/etasr.4034

10. Кузьмин А.М., Гашевский Е.М. Исследование термодинамических процессов парциального окисления в газогенераторе синтез-газа // Научный журнал Российского газового общества. 2023. № 1. С. 106–112. doi: 10.55557/2412-6497-2023-1-106-112

11. Кочуров Б.И., Глуховская М.Ю., Гарицкая М.Ю., Евстифеева Т.А. О методических подходах к определению углеродного следа // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 216–224. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-216-224

12. Prifti K., Lechtenberg F., Manenti F., Espuña A., Graells M. Comparing the climate impact of methanol production in Europe: Steam methane reforming vs. Plastic waste gasification processes // Resour. Conserv. Recycl. 2024. V. 208. Article No. 107653. doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107653

13. Makaryan I.A., Salgansky E.A., Arutyunov V.S., Sedov I.V. Non-catalytic partial oxidation of hydrocarbon gases to syngas and hydrogen: a systematic review // Energies. 2023. V. 16. No. 6. Article No. 2916. doi: 10.3390/en16062916

14. Masum F.H., Tan E.C.D., Kolodziej C.P., Hawkins T.R. Life cycle assessment of methanol from fossil, biomass, and waste sources, and its use as a marine fuel in dual-fuel engines // Environ. Sci. Technol. 2025. V. 59. No. 43. P. 23239–23250. doi: 10.1021/acs.est.5c08873

15. Al-Yafei H., Aseel S., AlNouss A., AlJarrah M., Abdussamie N., Al-Kuwari A., Kerret A., Ghafoor N.A., Winarno M.R., Al-Bader A., Al Tamimi T., Sabbah S. Driving Green: a comprehensive sustainability analysis of natural gas-to-methanol and methanol-to-gasoline supply chains // Sustainability. 2026. V. 18. No. 1. Article No. 527. doi: 10.3390/su18010527

16. 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. Lonnay, T.K. Maycock, T. Waterfield, K. Leitzell, N. Caud. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. 40 p.

17. Vasilyev A.V. Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oilfields as an object of ecological risk // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 78–84. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-078-084

18. Загашвили Ю.В., Ефремов В.Н., Кузьмин А.М., Лищинер И.И. Комплекс получения синтез-газа для

малотоннажного производства метанола // НефтеГазо-Химия. 2017. № 1.С. 19–26.

19. Кузьмин А.М., Гашевский Е.М., Кузьмина Ю.В. Обоснование геометрических характеристик газогенератора синтез-газа // Научный журнал Российского газового общества. 2023. № 3. С. 104–117.

20. Кузьмин А.М., Улманис А.А., Ценева С.Н., Буслаев Г.В., Морин А.А. Техничко-экономическая оценка технологии малотоннажного производства метанола при парциальном окислении природного газа воздухом // Нефтегазовое дело. 2022. № 1. С. 144–169. doi: 10.17122/ogbus-2022-1-144-169

21. Брейли Р., Майерс С. Принципы корпоративных финансов. М.: Олимп-Бизнес, 2016. 1008 с.

22. Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М. Оптимизация состава синтез-газа для малотоннажного производства метанола // НефтеГазоХимия. 2018. № 3. С. 39–43. doi: 10.24411/2310-8266-2018-10303

23. Загашвили Ю.В., Кузьмин А.М. Влияние состава водородсодержащего газа на выход метанола // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 10. С. 187–195. doi: 10.18799/24131830/2020/10/2871

24. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tarasov A.L. Conversion of associated petroleum gas into aromatic hydrocarbons // Catal. Ind. 2019. V. 11. No. 2. P. 138–146. doi: 10.1134/S2070050419020077

25. Лищинер И.И., Малова О.В., Толчинский Л.С. Модульные энерготехнологические установки Энергосинтоп // Газохимия: состояние и пути развития в XXI веке: труды Московского семинара по газохимии 2012–2013 гг. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2014. С. 140–160.

References

1. Kemalov R.A., Kemalov A.F. Technologies for methanol production and application. Kazan: Kazan University Publ., 2016. 167 p. (in Russian).

2. Arutyunov V.S., Golubeva I.A., Eliseev O.L., Zhagfarov F.G. Technology of hydrocarbon gas processing. Moskva: Yurayt Publ., 2020. 723 p. (in Russian).

3. Arutyunov V.S. Oxidative conversion of natural gas. Moskva: Krasand Publ., 2011. 590 p. (in Russian).

4. Magson J., Lee Chan T.G., Mohammed A., Ward K. Towards flexible large-scale, environmentally sustainable methanol and ammonia co production using industrial symbiosis // RSC Sustainability. 2025. V. 3. No. 3. P. 1157–1169. doi: 10.1039/d4su00647j

5. Kuzmin A.M. Associated petroleum gas processing into methanol: environmental impacts of flaring and prospects for low-carbon energy: a review // Theoretical and Applied Ecology. 2026. No. 2. P. 29–39 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2026-2-029-039

6. Kantor G.Ya., Syrchina N.V. Alternative assessment of methane's contribution to the greenhouse effect //

Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 3. P. 197–207 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-197-207

7. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. 1974. V. 3. No. 2. P. 269–289. doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2

8. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Symp. Combust. Proc. 1977. V. 16. No. 1. P. 719–729. doi: 10.1016/S0082-0784(77)80366-4

9. Bouziane A., Alami A., Zaitri M., Bouchame B., Bouchetara M. Investigation of swirl stabilized CH₄ air flame with varied hydrogen content by using computational fluid dynamics (CFD) to study the temperature field and flame shape // Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 2021. V. 11. No. 2. P. 6943–6948. doi: 10.48084/etasr.4034

10. Kuzmin A.M., Gashevskiy E.M. Investigation of thermodynamic processes of partial oxidation in a synthesis gas generator // Scientific journal of Russian Gas Society. 2023. No. 1. P. 106–112 (in Russian). doi: 10.55557/2412-6497-2023-1-106-112

11. Kochurov B.I., Glukhovskaya M.Yu., Garitskaya M.Yu., Evstifeeva T.A. On methodological approaches to determining the carbon footprint // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 216–224 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-216-224

12. Prifti K., Lechtenberg F., Manenti F., Espuña A., Graells M. Comparing the climate impact of methanol production in Europe: Steam methane reforming vs. Plastic waste gasification processes // Resour. Conserv. Recycl. 2024. V. 208. Article No. 107653. doi: 10.1016/j.resconrec.2024.107653

13. Makaryan I.A., Salgansky E.A., Arutyunov V.S., Sedov I.V. Non-catalytic partial oxidation of hydrocarbon gases to syngas and hydrogen: a systematic review // Energies. 2023. V. 16. No. 6. Article No. 2916. doi: 10.3390/en16062916

14. Masum F.H., Tan E.C.D., Kolodziej C.P., Hawkins T.R. Life cycle assessment of methanol from fossil, biomass, and waste sources, and its use as a marine fuel in dual-fuel engines // Environ. Sci. Technol. 2025. V. 59. No. 43. P. 23239–23250. doi: 10.1021/acs.est.5c08873

15. Al-Yafei H., Aseel S., AlNouss A., AlJarrah M., Abdussamie N., Al-Kuwari A., Kerret A., Ghafoor N.A., Winarno M.R., Al-Bader A., AlTamimi T., Sabbah S. Driving Green: a comprehensive sustainability analysis of natural gas-to-methanol and methanol-to-gasoline supply chains // Sustainability. 2026. V. 18. No. 1. Article No. 527. doi: 10.3390/su18010527

16. 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.

17. Vasilyev A.V. Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields as an object of ecological risk // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 78–84. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-078-084

18. Zagashvili Yu.V., Efremov V.N., Kuzmin A.M., Lishchiner I.I. Complex for obtaining synthesis-gas for small-tonnage production of methanol // NefteGazoKhimiya. 2017. No. 1. P. 19–26 (in Russian).

19. Kuzmin A.M., Gashevskiy E.M., Kuzmina Yu.V. Substantiation of the geometric characteristics of a synthesis gas generator // Scientific journal of Russian Gas Society. 2023. No. 3. P. 104–117 (in Russian).

20. Kuzmin A.M., Ulmanis A.A., Tseneva 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 and Gas Business. 2022. No. 1. P. 144–169 (in Russian). doi: 10.17122/ogbus-2022-1-144-169

21. Brealey R.A., Myers S.C. Principles of corporate finance. Moskva: Olimp-Biznes, 2016. 1008 p. (in Russian).

22. Zagashvili Yu.V., Kuzmin A.M. Optimization of syngas composition for small-scale methanol production // NefteGazoKhimiya. 2018. No. 3. P. 39–43 (in Russian). doi: 10.24411/2310-8266-2018-10303

23. 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

24. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tarasov A.L. Conversion of associated petroleum gas into aromatic hydrocarbons // Catal. Ind. 2019. V. 11. No. 2. P. 138–146. doi: 10.1134/S2070050419020077

25. Lishchiner I.I., Malova O.V., Tolchinsky L.S. Modular energy-technology units Energosintop // Gas chemistry: state and ways of development in the 21st century: trudy Moskovskogo seminar po gazokhimii 2012–2013. Moskva: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2014. P. 140–160 (in Russian).

Модельный эксперимент по оценке влияния штамма-нефтедеструктора *Pseudomonas schmalbachii* N3.1 и растений-ремедиантов на биологическую активность загрязнённой нефтью и гербицидами почвы

© 2026. Т. Ю. Коршунова, д. б. н., в. н. с., Л. А. Кульбаева, м. н. с.,
Е. В. Кузина, к. б. н., с. н. с., М. Г. Искужина, к. б. н., н. с.,
Г. Ф. Рафикова, к. б. н., с. н. с., С. Р. Мухаматдырова, к. б. н., с. н. с.,
Уфимский Институт биологии
Уфимского федерального исследовательского центра РАН (УИБ УФИЦ РАН),
450054, Россия, г. Уфа, пр. Октября, д. 69,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

Растущая потребность в источниках энергии ведёт к усилению контаминации почв (в том числе сельскохозяйственных) нефтепродуктами, что требует поиска эффективных методов восстановления нарушенных территорий. В работе оценивается эффективность применения штамма-нефтедеструктора *Pseudomonas schmalbachii* N3.1 отдельно и совместно с растениями люпина и овса для очистки от нефти почвы, дополнительно загрязнённой гербицидами на основе имазетапира или трибенурон-метила. Анализировались изменения численности микроорганизмов (аммонифицирующих, углеводородокисляющих, олигонитрофильных), дыхательной и ферментативной активности почвы, а также содержания в ней нефтепродуктов. Установлено, что нефть менее токсична для микробиоценоза почвы, чем гербициды, а сочетание растений и бактерий существенно повышает количество микроорганизмов изученных эколого-трофических групп. При раздельном использовании люпина и бактерий дыхательная активность почвы с нефтью увеличивалась на 31–36 %. Наибольшая активность каталазы зафиксирована под посевами овса, в том числе в инокулированной почве (8,72–12,25 и 9,12–10,95 мл O₂/г мин соответственно). Биоремедиация способствовала росту инвертазной активности (в 1,7–3,5 раза), при этом максимальный эффект отмечался при сочетании растений и микроорганизмов (2,44–4,37 и 2,09–4,51 мг глюкозы/24 ч/г в почве с люпином и овсом соответственно). Все виды биоремедиации снижали содержание нефтепродуктов в почве, но минимальный показатель был достигнут при совместном использовании *P. schmalbachii* N3.1 и растений овса (2,3–2,8 г/кг).

Ключевые слова: нефть, гербициды, бактерии-нефтедеструкторы, фиторемедианты, дыхательная и ферментативная активность.

Model experiment to assess the effect of oil-destructor strain *Pseudomonas schmalbachii* N3.1 and remediant plants on the biological activity of soil contaminated with oil and herbicides

© 2026. Т. Yu. Korshunova ORCID: 0000-0002-6186-0827,
L. A. Kulbaeva ORCID: 0009-0007-0999-7125, E. V. Kuzina ORCID: 0000-0002-6905-0108,
M. G. Iskuzhina ORCID: 0000-0003-0196-9596, G. F. Rafikova ORCID: 0000-0001-7655-5588,
S. R. Mukhamatdyarova ORCID: 0000-0001-7641-7943,
Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences (UIB UFRC RAS),
69, Oktyabrya Ave., Ufa, Russia, 450054,
e-mail: korshunovaty@mail.ru

The increasing demand for energy sources is leading to greater contamination of soils, including agricultural, by oil products. It requires the search for effective methods to restore the disturbed territories. This study evaluates the effectiveness of using the hydrocarbon-degrading strain *Pseudomonas schmalbachii* N3.1, both individually and in combination with *Lupinus albus* L. and *Avena sativa* L. plants to purify soil from oil that has been contaminated with imazethapyr- or tribenuron-methyl-based herbicides. The study analyzes changes in the abundance of microorganisms

(ammonifying, hydrocarbon oxidizing, oligonitrophilic), soil respiratory and enzyme activity, as well as the soil content of oil products. It was found that oil is less toxic to the soil microbiocenosis than the herbicides, while the combination of plants and bacteria significantly increases the number of microorganisms of the studied groups. When *L. albus* and bacteria were applied separately, soil respiratory activity in oil-contaminated samples increased by 31–36 %. The highest catalase activity was recorded in *A. sativa* plantings, including inoculated soils (8.72–12.25 and 9.12–10.95 ml O₂/g·min, respectively). Bioremediation promoted an increase in invertase activity (by 1.7–3.5 times), with the maximum effect observed when plants and microorganisms were combined (2.44–4.37 and 2.09–4.51 mg glucose/24 h/g in soils with *L. albus* and *A. sativa*, respectively). All types of bioremediation reduced the oil product content in soils. The lowest values were achieved with the combined use of *P. schmalbachii* N3.1 and *A. sativa* (2.3–2.8 g/kg). This was probably due to the highest number of hydrocarbon-oxidizing bacteria (up to 13·10⁷ CFU/g) and significant catalase activity (up to 11 ml O₂/g·min).

Keywords: oil, herbicides, oil degrading bacteria, phytoremediants, respiratory and enzymatic activity.

Аварии на нефтепроводах, проходящих через сельскохозяйственные угодья, приводят к выведению значительных площадей плодородных земель из целевого оборота. Как правило, такие почвы для подавления сорной растительности подвергали многолетней обработке гербицидами. Эти препараты затрудняют использование биологических методов для ликвидации последствий нефтяного загрязнения, так как присутствие их остаточных количеств негативно сказывается на росте и развитии растений [1, 2], а также отрицательно воздействует на работу микробного сообщества почвы и её ферментативную активность [3]. Перспективным выходом из сложившейся ситуации является интродукция микроорганизмов-нефтедеструкторов, которые были бы устойчивы к гербицидам как дополнительным поллютантам и одновременно стимулировали рост фиторемедиантов при комплексной контаминации нефтью и гербицидами. Благодаря своей способности к разложению углеводов эти бактерии могут положительно влиять на активность ферментов почвы и жизнедеятельность её микробиома. Кроме того, внесение полифункциональных микроорганизмов позволит растениям легче переносить стрессовые условия, вызванные полихимическим загрязнением почвы, а также эффективнее участвовать в процессе её ремедиации. Результаты комплексной оценки воздействия углеводов, гербицидов, микроорганизмов и растений по отдельности и совместно на биологическую активность почвы могут быть впоследствии использованы для создания методов очистки и биоиндикации нарушенных территорий.

Целью работы являлось изучение влияния устойчивых к гербицидам бактерий-нефтедеструкторов, стимулирующих рост растений, а также фиторемедиантов на микробиологическую, респираторную, ферментативную активность и содержание углеводов в почве, загрязнённой нефтью и/или гербицидами.

Объекты и методы исследования

Для бактеризации почвы применяли штамм *Pseudomonas schmalbachii* N3.1 из коллекции Уфимского Института биологии УФИЦ РАН (ВКМ В-3755), выделенный авторами статьи из нефтезагрязнённой почвы в Нефтеюганском районе ХМАО – Югра Тюменской области. Штамм разлагает нефть в жидкой среде на 73 %, устойчив к гербицидам классов имидазолинонов и сульфанилмочевин, продуцирует фитогормон индолил-3-уксусную кислоту (ИУК) и обладает способностью к усилению роста растений в почве, загрязнённой нефтью или гербицидами [4].

В качестве фиторемедиантов выступали растения люпина белого (*Lupinus albus* L.) сорта Дера (сем. Fabaceae) и овса посевного (*Avena sativa* L.) сорта Рысак (сем. Poaceae), которые, как было установлено нами ранее [5], проявляли устойчивость к нефти и гербицидам различных классов.

Для обработки почвы применяли системные гербициды российского производства: Тапир (класс имидазолиноны, действующее вещество имазетапир, ООО «Агро Эксперт Групп») и Спецназ (класс сульфанилмочевины, действующее вещество трибенурон-метил, ООО «Евроагрокемикалс») [6].

В эксперименте использовали чернозём оподзоленный (*Luvic Phaeozems*) (верхний горизонт, 0–20 см), очищенный от камней и растительных остатков и характеризующийся следующими признаками: гумус – 9,5 %, N_{общ} – 0,53 %, P_{вал} – 0,2 %, K_{вал} – 1,6 %, рН_{ккл} – 6,16. В сосуды объёмом 500 мл помещали по 400 г почвенно-песчаной смеси (9 : 1) или почвенно-песчаной смеси, загрязнённой товарной нефтью в количестве 20,0 г/кг почвы. Далее увлажняли водой или раствором какого-либо гербицида, дозы внесения которых были увеличены в 2 раза по сравнению с рекомендациями производителя и составили

для Тапира 20,0 мкл/кг почвы, а для Спецназа – 0,5 мг/кг почвы.

Непосредственно перед посадкой растений почву поливали водопроводной водой или разбавленной культуральной жидкостью штамма *P. schmalbachii* N3.1 с титром 10^6 КОЕ/мл. Затем в стаканы высаживали по 5 или 6 трёхсуточных проростков люпина или овса соответственно. Растения выращивали 21 сутки при температуре 22–24 °C в условиях светоплощадки при интенсивности светового потока 240 мкмоль/м · с ФАР, 14-часовом фотопериоде. Для оптимизации водно-воздушного режима использовали дренаж и стеклянные трубки, влажность в течение эксперимента поддерживали на уровне 60 % от полной влагоёмкости.

Варианты опыта (добавки к почве): № 1–3. Нефть или Тапир или Спецназ; № 4–5. Нефть + Тапир или Спецназ; № 6–7. Растения люпина или овса + нефть; № 8–11. Растения люпина или овса + Тапир или Спецназ; № 12–15. Растения люпина или овса + нефть + Тапир или Спецназ; № 16–18. *P. schmalbachii* N3.1 + нефть или Тапир или Спецназ; № 19–20. *P. schmalbachii* N3.1 + нефть + Тапир или Спецназ; № 21–26. Растения люпина или овса + *P. schmalbachii* N3.1 + нефть или Тапир или Спецназ; № 27–30. Растения люпина или овса + *P. schmalbachii* N3.1 + нефть + Тапир или Спецназ.

После окончания эксперимента оценивали численность некоторых эколого-трофических групп микроорганизмов (аммонифицирующих, углеводородокисляющих (УОМ), олигонитрофильных (совместно с азотфиксирующими), содержание нефтепродуктов в почве, её ферментативную и респираторную активность.

Учёт численности микроорганизмов осуществляли посевом почвенной суспензии на агаризованные питательные среды: аммонификаторов – на мясо-пептонный агар, УОМ – на среду Раймонда со 100 мкл стерильной нефти в качестве источника углерода, олигонитрофилов и азотфиксаторов – на среду Эшби [7, 8].

Содержание нефтепродуктов в почве устанавливали гравиметрически в соответствии с ПНД Ф 16.1.41-04 и выражали в процентах.

Активность каталазы анализировали газометрически по объёму выделившегося кислорода при разложении перекиси водорода, инвертазы – спектрофотометрически путём определения количества редуцирующих сахаров, уреазы – колориметрически через

образование окрашенных комплексов с реактивом Несслера [9].

Респираторную активность почвы определяли методом абсорбции гидроксида натрия по количеству выделившегося CO_2 [10].

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных программ MS Excel. Результаты представлены как среднее $\pm$ стандартная ошибка. Достоверность различий оценивали с помощью t-критерия Стьюдента. Повторность вариантов трёхкратная.

Результаты и обсуждение

Почвенные микроорганизмы являются важнейшим звеном в биогеохимических циклах минеральных элементов и участвуют в обеспечении экосистемных и биосферных функций почвы [11]. Они оперативно реагируют на любые перемены в окружающей среде и могут служить надёжными индикаторами биологической активности почвы и её нарушения под влиянием антропогенного воздействия [12]. Высокая чувствительность микробного сообщества позволяет проводить раннюю диагностику любых изменений и использовать показатели численности микроорганизмов различных физиолого-биохимических групп для биомониторинга состояния почв. Известно, что на плотность микробных популяций существенное влияние оказывает pH почвы [13]. Во всех вариантах опыта с присутствием нефти происходило небольшое снижение pH_{KCl} с 6,16 до 6,11–6,13, что, вероятно, связано с постепенным разложением углеводов до органических кислот. Несмотря на некоторое подкисление среды, её реакция оставалась благоприятной для почвенной микробиоты, поскольку диапазон pH от 6 до 8 считается для неё оптимальным [13]. В отличие от нефти, внесение гербицидов не оказало влияния на pH_{KCl} почвы (он оставался на уровне 6,15–6,16), что уже отмечалось ранее [14].

В настоящем исследовании при нефтяном и комбинированном загрязнении количество аммонифицирующих, УОМ и олигонитрофильных (включая азотфиксирующие) микроорганизмов превышало таковое в почве только с гербицидами (табл.). Очевидно, что нефть оказывала менее выраженное токсическое действие, чем химические препараты и каким-то образом частично нивелировала их негативное влияние на почвенный микробценоз. Использование по отдельности штамма *P. schmalbachii* N3.1 или фиторемедиантов

Численность микроорганизмов в почве, $\cdot 10^6$ КОЕ/г
The number of microorganisms in the soil, $\cdot 10^6$ CFU/g

Вариант (добавки к почве) Variant (soil additives)		Аммонифи- цирующие Ammonifying	Угдеводород- окисляющие Hydrocarbon- oxidizing	Олиго- нитрофильные Oligonitrophilic
Без ремедиации No remediation	Нефть / Oil	$20,0 \pm 0,8$	$6,1 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,2$
	Тапир / Tapir	$7,3 \pm 0,2$	$3,3 \pm 0,1$	$3,3 \pm 0,1$
	Спецназ / Spetsnaz	$8,4 \pm 0,3$	$2,2 \pm 0,1$	$4,1 \pm 0,2$
	Нефть + Тапир Oil + Tapir	$25,8 \pm 0,5$	$9,9 \pm 0,3$	$9,2 \pm 0,2$
	Нефть + Спецназ Oil + Spetsnaz	$36,0 \pm 0,8$	$17,9 \pm 0,2$	$9,7 \pm 0,3$
<i>Lupinus albus</i>	Нефть / Oil	$100,2 \pm 4,3$	$12,8 \pm 0,3$	$28,0 \pm 0,8$
	Тапир / Tapir	$50,1 \pm 1,7$	$6,4 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,2$
	Спецназ / Spetsnaz	$30,3 \pm 0,6$	$2,8 \pm 0,1$	$10,2 \pm 0,3$
	Нефть + Тапир Oil + Tapir	$99,5 \pm 3,6$	$17,1 \pm 0,4$	$64,6 \pm 1,5$
	Нефть + Спецназ Oil + Spetsnaz	$160,4 \pm 4,6$	$20,7 \pm 0,8$	$67,7 \pm 1,8$
<i>Avena sativa</i>	Нефть / Oil	$29,8 \pm 1,1$	$7,9 \pm 0,3$	$10,3 \pm 0,4$
	Тапир / Tapir	$7,1 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,1$	$8,2 \pm 0,2$
	Спецназ / Spetsnaz	$20,0 \pm 0,9$	$2,3 \pm 0,2$	$14,1 \pm 0,6$
	Нефть + Тапир Oil + Tapir	$79,5 \pm 2,9$	$8,7 \pm 0,2$	$12,0 \pm 0,3$
	Нефть + Спецназ Oil + Spetsnaz	$90,3 \pm 3,3$	$10,2 \pm 0,2$	$40,4 \pm 1,1$
<i>P. schmalbachii</i> N3.1	Нефть / Oil	$39,2 \pm 1,6$	$38,6 \pm 1,5$	$19,4 \pm 0,8$
	Тапир / Tapir	$12,3 \pm 0,4$	$8,9 \pm 0,3$	$8,3 \pm 0,2$
	Спецназ / Spetsnaz	$11,1 \pm 0,3$	$9,8 \pm 0,4$	$9,8 \pm 0,3$
	Нефть + Тапир Oil + Tapir	$50,4 \pm 1,6$	$23,7 \pm 0,8$	$28,6 \pm 0,5$
	Нефть + Спецназ Oil + Spetsnaz	$46,8 \pm 1,8$	$24,9 \pm 0,9$	$24,6 \pm 0,4$
<i>L. albus</i> + <i>P. schmalbachii</i> N3.1	Нефть / Oil	$96,5 \pm 2,6$	$39,0 \pm 1,3$	$65,7 \pm 1,3$
	Тапир / Tapir	$47,3 \pm 1,4$	$9,5 \pm 0,3$	$32,6 \pm 0,6$
	Спецназ / Spetsnaz	$52,6 \pm 1,5$	$7,4 \pm 0,2$	$17,4 \pm 0,4$
	Нефть + Тапир Oil + Tapir	$95,9 \pm 3,5$	$46,6 \pm 2,1$	$40,8 \pm 0,8$
	Нефть + Спецназ Oil + Spetsnaz	$90,2 \pm 3,1$	$30,3 \pm 0,9$	$69,8 \pm 1,9$
<i>A. sativa</i> + <i>P. schmalbachii</i> N3.1	Нефть / Oil	$158,4 \pm 5,3$	$122,9 \pm 5,1$	$38,7 \pm 1,4$
	Тапир / Tapir	$36,0 \pm 1,2$	$8,9 \pm 0,2$	$32,8 \pm 1,2$
	Спецназ / Spetsnaz	$62,8 \pm 1,9$	$12,6 \pm 0,5$	$8,9 \pm 0,3$
	Нефть + Тапир Oil + Tapir	$168,0 \pm 5,7$	$99,1 \pm 2,3$	$27,3 \pm 0,5$
	Нефть + Спецназ Oil + Spetsnaz	$99,4 \pm 3,7$	$93,3 \pm 2,1$	$56,1 \pm 1,2$

(особенно люпина) приводило к увеличению численности всех трёх эколого-трофических групп микроорганизмов по сравнению с почвой без биорекультивации (табл.). При этом вполне ожидаемо, что в инокулированной штаммом-нефтедеструктором почве численность УОМ была выше, чем в почве с растениями. Плотность популяций всех учитываемых групп ещё более возрастала при совместном применении растений и *P. schmalbachii* N3.1, вероятно, за счёт «ризосферного эффекта» [15]. Самое значительное количество УОМ зафиксировано в бактеризованной почве под посевами овса, а олигонитрофильных микроорганизмов – в инокулированной почве с люпином. Как известно, корневые экссудаты, содержащие различные питательные вещества (сахара, аминокислоты, фенолы и пр.), играют важную роль в селекции микроорганизмов ризосферы [16], поэтому можно предположить, что корневые выделения овса наиболее подходили для УОМ, а люпина – для олигонитрофилов и азотфиксаторов.

Выделение почвой углекислого газа (дыхание) характеризует интенсивность газообмена между почвой и атмосферой. Решающая роль в этом процессе принадлежит микроорганизмам, которые разлагают органическое вещество. Поэтому скорость эмиссии CO_2 даёт представление о численности почвенной микробиоты и является одним из показателей биологической активности почвы [17]. Антропогенное воздействие приводит к изменению структуры микробсообщества и его способности к использованию органических соединений. При этом может наблюдаться как снижение количества выделившегося углекислого газа [18], так и его увеличение, например, после разливов нефти, что обусловлено ростом численности, в первую очередь, УОМ [19]. В настоящем эксперименте в присутствии только нефти применение по отдельности люпина и бактерий приводило к повышению дыхательной активности почвы на 31–36 % по сравнению с нефтесодержащей почвой без биоремедиации (рис. 1а).

Вероятно, это связано со значительным увеличением численности аммонифицирующих микроорганизмов и УОМ (табл.) в ответ на появление дополнительного источника углерода и энергии в виде нефти. Также значительный вклад в выработку CO_2 в почве вносят растения за счёт дыхания корней и образования ими экссудатов, которые способствуют возрастанию количества ризосферных микроорганизмов, в том числе бактерий-

деструкторов поллютантов [20]. Кроме того, корни способны экскретировать ферменты, осуществляющие деградацию органических веществ (например, ПАУ), находящихся в почве [21] и, тем самым, тоже увеличивать эмиссию углекислого газа. Поэтому самая высокая дыхательная активность почвы только с нефтью (10,51 и 13,32 CO_2 -С/г·ч) наблюдалась при одновременном использовании растений (особенно овса) и штамма *P. schmalbachii* N3.1, способного к стимуляции роста растений в загрязнённой почве [4]. Такое усиление дыхания нефтесодержащей почвы при применении микробно-растительных ассоциаций уже отмечалось ранее [22].

Фиторемедианты оказывали разнонаправленный эффект на респираторную активность почвы с гербицидами. По сравнению с аналогичными вариантами без биоремедиации, под посевами люпина она возрастала или оставалась на прежнем уровне, а под посадками овса – уменьшалась (в том числе в инокулированной почве). Аналогичная картина наблюдалась и при комбинированном загрязнении.

Почвенные ферменты играют ведущую роль в разложении и трансформации органического вещества почвы, высвобождают доступные питательные субстраты для микробиоты и участвуют в циклах биогенных элементов [12]. Их активности придаётся большое значение при оценке влияния поллютантов на экологическое состояние почв [23]. Фермент класса оксидоредуктаз – каталаза – ускоряет разложение пероксида водорода, образующегося в результате биохимических реакций окисления органических соединений (включая поллютанты), метаболизма аэробных микроорганизмов и в процессе дыхания растений, на воду и молекулярный кислород. В результате снижается токсическое действие пероксида водорода, и создаются более благоприятные условия для жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, в том числе для бактерий-деструкторов ксенобиотиков. Поэтому каталазная активность (КА), наряду с численностью основных групп микроорганизмов, отражает интенсивность процессов очищения почвы от нефти. В настоящей работе использование растений и бактерий по отдельности и совместно приводило к увеличению КА во всех вариантах опыта по сравнению с почвой без рекультивации (рис. 1б), что свидетельствует об ускорении протекания окислительно-восстановительных реакций в почве. При этом реактивность фермента в инокулированной и неинокулированной почве

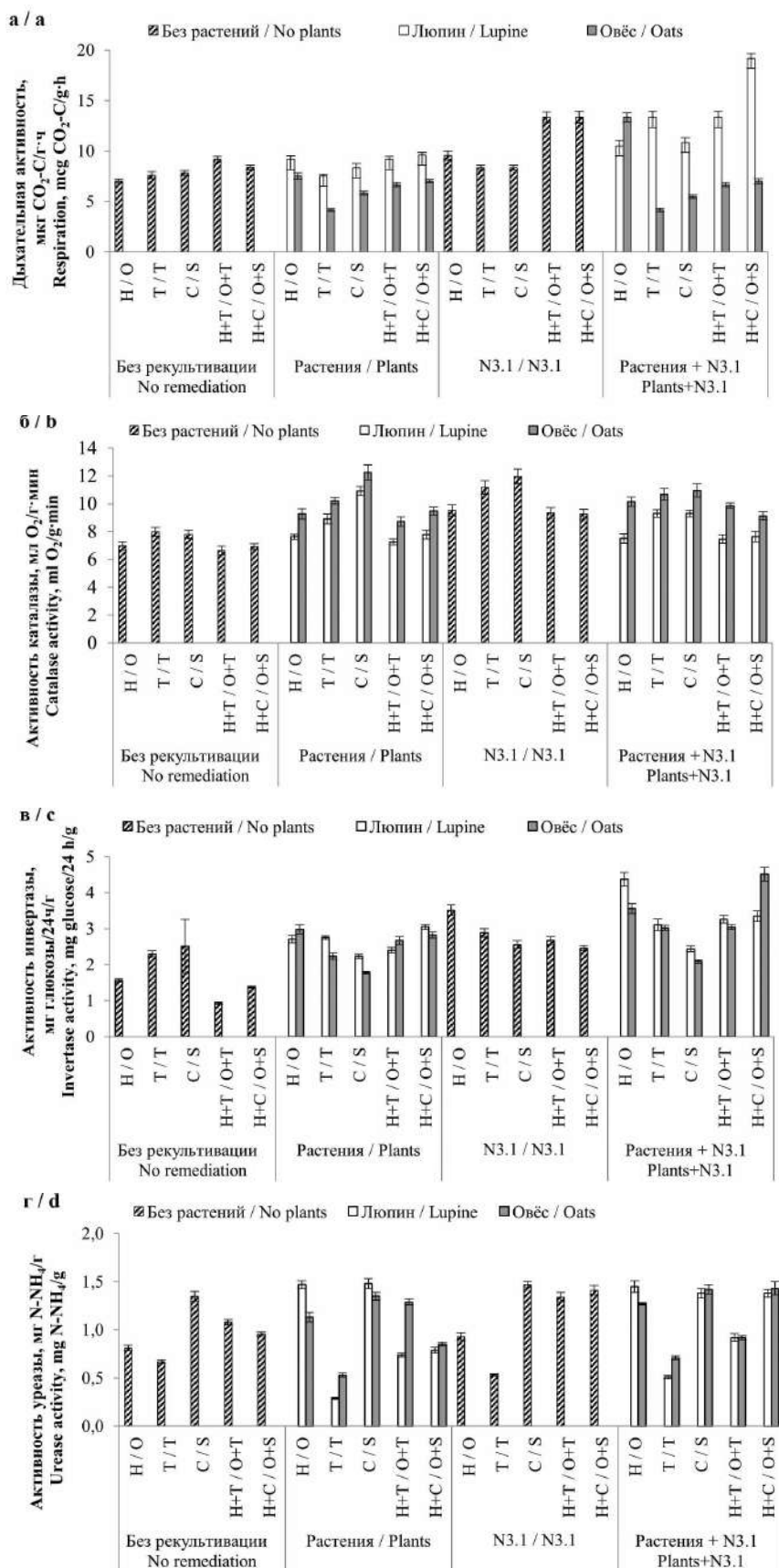


Рис. 1. Дыхательная (а), каталазная (б), инвертазная (в) и уреазная (г) активность почвы. N3.1 – *Pseudomonas schmalbachii* N3.1; Н – нефть; Т – Тапир; С – Спецназ; Н+Т – нефть + Тапир; Н+С – нефть + Спецназ / **Fig. 1.** Soil respiratory (a), catalase (b), invertase (c) and urease (d) activity. N3.1 – *Pseudomonas schmalbachii* N3.1; O – oil; T – Tapir; S – Spetsnaz; O+T – oil + Tapir; O+S – oil + Spetsnaz

под посевами овса (9,12–10,95 и 8,72–12,25 мл O_2 /г·мин соответственно) была более высокой по сравнению с аналогичными вариантами в почве с люпином (7,46–9,29 и 7,25–10,92 мл O_2 /г·мин соответственно). Как уже отмечалось ранее [24], гербициды стимулировали КА, но их внесение в почву с нефтью либо угнетало её, либо не оказывало эффекта на этот показатель.

При аварийных нефтеразливах в почве происходит изменение соотношения C : N, что влияет, в частности, на процессы нитрификации и круговорот углерода и азота. Инвертаза участвует в биохимической трансформации углеводов, расщепляя гликозидные связи сахарозы до мономеров – глюкозы и фруктозы, которые являются источником питания для микроорганизмов. Поэтому высокий уровень активности этого фермента свидетельствует о развитии почвенного микробоценоза. В описываемом опыте по сравнению с нерекультивированной почвой все способы биоремедиации нефтесодержащей почвы (в том числе с гербицидами) приводили к повышению инвертазной активности (ИА) (в 1,7–2,8 раза в почве без гербицидов и в 2,6–3,5 раза в вариантах «нефть + Тапир» и 1,8–3,3 раза в вариантах «нефть + Спецназ») (рис. 1в). Вероятно, это происходило за счёт снижения содержания нефтепродуктов в почве и, как следствие, уменьшения их отрицательного воздействия на реактивность фермента. Гербициды как монозагрязнители по-разному влияли на этот показатель. При использовании Тапира наблюдалась тенденция повышения ИА, а при обработке Спецназом – её снижения. Что касается растений, то оба вида оказывали приблизительно одинаковый эффект на ИА. Но при этом можно отметить более высокий

уровень ИА при их совместном применении со штаммом *P. schmalbachii* N3.1.

Уреаза катализирует гидролиз мочевины на аммиак и углекислый газ, способствуя минерализации органических азотсодержащих веществ в почве. Она связана с почвенным органоминеральным комплексом и её активность характеризует обеспеченность растений аммонийным азотом. В данном эксперименте для уреазной активности (УА) была характерна следующая закономерность – стабильно высокое значение (1,35–1,47 мг $N-NH_4$ /г почвы) в присутствии гербицида Спецназ как монозагрязнителя, независимо от варианта биорекультивации или её отсутствия (рис. 1г). Вероятно, это связано с тем, что указанный препарат относится к классу сульфанилмочевин и содержит в своём составе основной субстрат для действия уреазы – мочевины. Кроме того, уровень УА при одновременном загрязнении нефтью и Спецназом был выше (и равен таковому в почве только с этим гербицидом) в тех вариантах, где присутствовали бактерии (1,38–1,43 мг $N-NH_4$ /г) по сравнению с почвой без интродукции микроорганизмов (почва без рекультивации и почва только с растениями) (0,79–0,96 мг $N-NH_4$ /г). Вероятно, штамм *P. schmalbachii* N3.1 за счёт своей способности к деструкции нефти снижал её токсическое действие на УА.

Использование различных приёмов биоремедиации приводило к уменьшению содержания нефтепродуктов в почве, даже при наличии в ней гербицидов (рис. 2).

По мере увеличения эффективности эти варианты располагались в следующей последовательности (в скобках указано количество нефтепродуктов после примене-

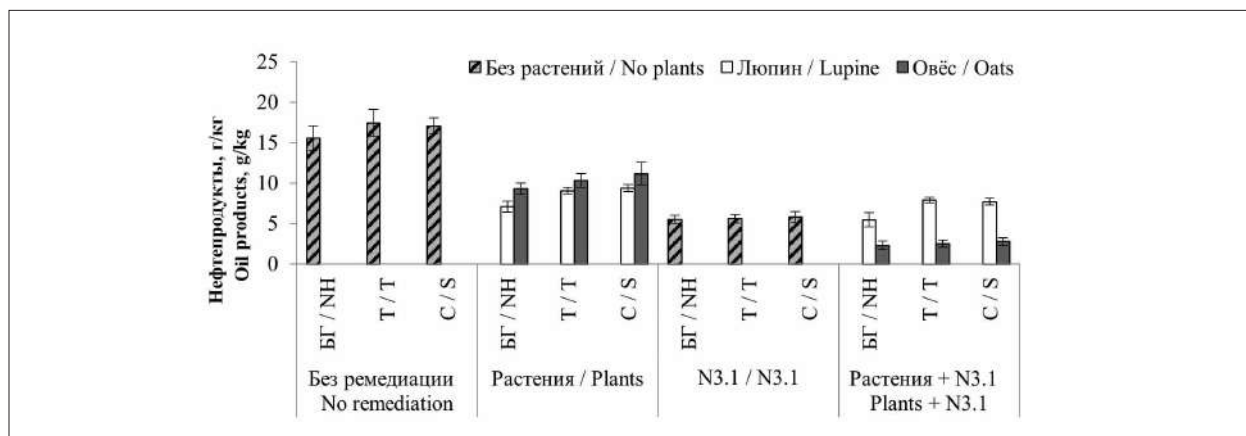


Рис. 2. Содержание нефтепродуктов в почве после окончания опыта, г/кг. N3.1 – *P. schmalbachii* N3.1; БГ – без гербицидов; Т – Тапир; С – Спецназ
Fig. 2. Content of oil products in the soil after the end of the experiment, g/kg. N3.1 – *P. schmalbachii* N3.1; NH – no herbicides; T – Tapir; S – Spetsnaz

ния соответствующего приёма, г/кг): овёс (9,3–11,2) < люпин (7,1–9,4) < *P. schmalbachii* N3.1 (5,5–5,8) < люпин + *P. schmalbachii* N3.1 (5,5–7,9) < овёс + *P. schmalbachii* N3.1 (2,3–2,8). При этом, в тех сосудах, где почву не подвергали биологической очистке, содержание поллютанта находилось в пределах 15,6–17,4 г/кг. Обращает на себя внимание тот факт, что, хотя овёс проявил себя как фиторемедиант несколько хуже, чем люпин, его посадка в инокулированную почву способствовала наиболее значительному уменьшению содержания нефти, вероятно за счёт большего количества УОМ в ризосфере, а также значительного уровня КА (табл., рис.16). Гербициды оказывали достоверное ингибирующее влияние на деградацию нефти только в почве с люпином, независимо от наличия в ней бактерий.

Заключение

Таким образом, в модельном эксперименте применение устойчивых к гербицидам бактерий-нефтедеструкторов *P. schmalbachii* N3.1, а также растений-ремедиантов овса и люпина по отдельности и совместно положительно влияло на биологическую активность почвы, загрязнённой нефтью и/или гербицидами. Это проявлялось в увеличении численности аммонифицирующих, углеводородокисляющих и олигонитрофильных микроорганизмов, повышении респираторной, каталазной и инвертазной активности, а также снижении содержания нефтепродуктов. При этом одновременное использование бактерий и растений оказывало более выраженный эффект на эти показатели. Полученные результаты подтверждают перспективность применения микробно-растительных ассоциаций для биоремедиации почв, загрязнённых нефтью и гербицидами, и могут служить основой для разработки эффективных экологически безопасных технологий для восстановления техногенно нарушенных почв и их последующего возврата в сельскохозяйственное использование.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-24-00130, <https://rscf.ru/project/23-24-00130/>.

Литература

1. Choudhury P.P. Transformation of herbicides in the environment // Herbicide residue research in India. Environmental chemistry for a sustainable world / Eds. S. Sondhia, P. Choudhury, A. Sharma. Singapore:

Springer, 2019. P. 415–442. doi: 10.1007/978-981-13-1038-6_15

2. Колотова О.В., Нефедьева Е.Э., Грибуст И.Р., Сухова Е.А., Звада Е.А., Шевелёва В.В. Применение микробных биотехнологий для устранения в почве остатков гербицидов классов имидазолинонов и сульфанилмочевин (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 16–27. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-016-027

3. Kaur L., Kaur P. Degradation of imazethapyr in soil: impact of application rate, soil physicochemical properties and temperature // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2022. V. 19. P. 1877–1892. doi: 10.1007/s13762-021-03137-0

4. Кузина Е.В., Искужина М.Г., Мухаматдырова С.Р., Рамеев Т.В., Коршунова Т.Ю. Углеводородокисляющие бактерии, устойчивые к гербицидам, перспективные для фитобиоремедиации // Экобиотех. 2024. Т. 7. № 3. С. 156–163. doi: 10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163

5. 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

6. Пестициды.ru – Рациональное листовое питание [Электронный ресурс] <https://www.pesticidy.ru/> (Дата обращения: 15.03.2025).

7. Raymond R.L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Developments in industrial microbiology: proceedings of the general meeting of the Society for Industrial Microbiology. New York: Plenum Press, 1961. V. 2. P. 23–32.

8. Практикум по микробиологии / под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.

9. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 252 с.

10. Xu Y., Seshadri B., Bolan N., Sarkar B., Ok Y.S., Zhang W., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T., Dong Z. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals // Environ. Int. 2019. V. 125. P. 478–488. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.071

11. Schlöter M., Nannipieri P., Sørensen S.J., van Elsas J.D. Microbial indicators for soil quality // Biol. Fertil. Soils. 2018. V. 54. No. 1. P. 1–10. doi: 10.1007/s00374-017-1255-4

12. Никитин Д.А., Семёнов М.В., Чернов Т.И., Ксенофонтова Н.А., Железова А.Д., Иванова Е.А., Хитров Н.Б., Степанов А.Л. Микробиологические индикаторы экологических функций почв (обзор) // Почвоведение. 2022. № 2. С. 228–243. doi: 10.31857/S0032180X22020095

13. Neina D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation // Appl. Environ. Soil Sci. 2019. V. 2019. Article No. 5794869. doi: 10.1155/2019/5794869

14. Щукин С.В., Горнич Е.А., Труфанов А.М., Воронин А.Н., Ваганова Н.В. Влияние минимальной обработки, удобрений и гербицидов на динамику орга-

нического вещества и агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы в посевах яровых зерновых культур и вико-овсяной смеси // Известия ТСХА. 2022. № 2. С. 16–31. doi: 10.26897/0021-342X-2022-2-16-31

15. Домрачева Л.И., Скугорева С.Г., Ковина А.Л., Коротких А.И., Стариков П.А., Ашихмина Т.Я. Специфика растительно-микробных комплексов при антропогенном загрязнении почвы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 14–25. doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025

16. Галиева Г.Ш., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю. Растительный микробиом: происхождение, состав и функции // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2023. Т. 165. № 2. С. 231–262. doi: 10.26907/2542-064X.2023.2.231-262

17. Kudayarov V.N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink in the territory of Russia: an analytical review // Eurasian Soil Sc. 2018. V. 51. P. 599–612. doi: 10.1134/S1064229318060091

18. Стома Г.В., Манучарова Н.А., Белокопытова Н.А. Биологическая активность микробных сообществ в почвах некоторых городов России // Почвоведение. 2020. № 6. С. 703–715. doi: 10.31857/S0032180X2006012X

19. Вершинин А.А., Петров А.М., Юранец-Лужаева Р.Ч., Кузнецова Т.В., Хабибуллин Р.Э. Коэффициент микробного дыхания различных типов почв в условиях нефтяного загрязнения // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 4. С. 103–106.

20. Гончарова О.Ю., Матышак Г.В., Бобрик А.А., Тимофеева М.В., Сефилян А.Р. Оценка вклада корневого и микробного дыхания в общий поток CO₂ из торфяных почв и подзолов севера Западной Сибири методом интеграции компонентов // Почвоведение. 2019. № 2. С. 234–245. doi: 10.1134/S0032180X19020059

21. Dubrovskaya E., Pozdnyakova N., Golubev S., Muratova A., Grinev V., Bondarenkova A., Turkovskaya O. Peroxidases from root exudates of *Medicago sativa* and *Sorghum bicolor*: catalytic properties and involvement in PAH degradation // Chemosphere. 2017. V. 169. P. 224–232. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.027

22. Koohkan H., Mortazavi M.S., Golchin A., Najafi-Ghiri M., Golkhandan M., Akbarzadeh-Chomachaei G., Saraji F. The effect of petroleum levels on some soil biological properties under phytoremediation and bioaugmentation // Environ. Sci. Pollut. Res. 2023. V. 30. P. 60618–60637. doi: 10.1007/s11356-023-26730-x

23. Поляк Ю.М., Сухаревич В.И. Использование микроорганизмов для биоиндикации загрязнения почв: преимущества, ограничения и потенциал (обзор) // Проблемы агрохимии и экологии. 2024. № 4. С. 55–63. doi: 10.26178/AE.2024.39.85.007

24. Наими О.И. Активность каталазы в чернозёме обыкновенном и влияние на неё антропогенных факторов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2018. № 11-1. С. 12–15. doi: 10.24411/2500-1000-2018-10142

References

1. Choudhury P.P. Transformation of herbicides in the environment // Herbicide residue research in India. Environmental chemistry for a sustainable world / Eds. S. Sondhia, P. Choudhury, A. Sharma. Singapore: Springer, 2019. P. 415–442. doi: 10.1007/978-981-13-1038-6_15

2. Kolotova O.V., Nefedieva E.E., Gribust I.R., Sakhova E.A., Zvada E.A., Shevekeva V.V. Application of microbial biotechnologies to eliminate residues of herbicides of imidazolinone and sulfonyleurea classes in soil (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 16–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-016-027

3. Kaur L., Kaur P. Degradation of imazethapyr in soil: impact of application rate, soil physicochemical properties and temperature // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2022. V. 19. P. 1877–1892. doi: 10.1007/s13762-021-03137-0

4. Kuzina E.V., Iskuzhina M.G., Mukhamatdyarova S.R., Rameev T.V., Korshunova T.Yu. Hydrocarbon-oxidizing bacteria resistant to herbicides, promising for phytobioremediation // Ècobiotech. 2024. V. 7. No. 3. P. 156–163 (in Russian). doi: 10.31163/2618-964X-2024-7-3-156-163

5. 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 plant // Ècobiotech. 2023. V. 6. No. 3. P. 156–165 (in Russian). doi: 10.31163/2618-964X-2023-6-3-156-165

6. Pesticidy.ru – Racional'noe listovoe pitanie [Internet resource] <https://www.pesticidy.ru/> (Accessed: 15.03.2025).

7. Raymond R.L. Microbial oxidation of n-paraffinic hydrocarbons // Developments in industrial microbiology: proceedings of the general meeting of the Society for Industrial Microbiology. New York: Plenum Press, 1961. V. 2. P. 23–32.

8. Microbiology Workshop / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).

9. Khaziev F.Kh. Methods for soil enzymology. Moskva: Nauka, 2005. 252 p. (in Russian).

10. Xu Y., Seshadri B., Bolan N., Sarkar B., Ok Y.S., Zhang W., Rumpel C., Sparks D., Farrell M., Hall T., Dong Z. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals // Environ. Int. 2019. V. 125. P. 478–488. doi: 10.1016/j.envint.2019.01.071

11. Schlöter M., Nannipieri P., Sørensen S.J., van Elsas J.D. Microbial indicators for soil quality // Biol. Fertil. Soils. 2018. V. 54 (1). P. 1–10. doi: 10.1007/s00374-017-1255-4

12. Nikitin D.A., Semenov M.V., Chernov T.I., Ksenofontova N.A., Zhelezova A.D., Ivanova E.A., Khitrov N.B., Stepanov A.L. Microbiological indicators of ecological functions of soils // Pochvovedenie. 2022. No. 2. P. 228–243 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X22020095

13. Neina D. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation // Appl. Environ. Soil Sci. 2019. V. 2019. Article No. 5794869. doi: 10.1155/2019/5794869

14. Shchukin S.V., Gornich E.A., Trufanov A.M., Voronin A.N., Vaganova N.V. Effects of minimum tillage, fertilizers and herbicides on the dynamics of organic matter and agrochemical properties of sod-podzolic soil when growing spring grain crops and oat-vetch mixtures // *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2022. No. 2. P. 16–31 (in Russian). doi: 10.26897/0021-342X-2022-2-16-31
15. Domracheva L.I., Skugoreva S.G., Kovina A.L., Korotkikh A.I., Starikov P.A., Ashikhmina T.Ya. Specificity of plant-microbial complexes under anthropogenic soil pollution (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 14–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-014-025
16. Galieva G.Sh., Galitskaya P.Yu., Selivanovskaya S.Yu. Plant microbiome: origin, composition, and functions // *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2023. V. 165. No. 2. P. 231–262 (in Russian) doi: 10.26907/2542-064X.2023.2.231-262
17. Kudayarov V.N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink in the territory of Russia: an analytical review // *Eurasian Soil Sc.* 2018. V. 51. P. 599–612. doi: 10.1134/S1064229318060091
18. Stoma G.V., Manucharova N.A., Belokopytova N.A. Biological activity of microbial communities in soils of some Russian cities // *Pochvovedenie*. 2020. No. 6. P. 703–715 (in Russian). doi: 10.31857/S0032180X2006012X
19. Vershinin A.A., Petrov A.M., Yuranets-Luzhaeva R.Ch., Kuznetsova T.V., Khabibullin R.E. Coefficient of microbial respiration in different types of soils under oil pollution // *Herald of technological university*. 2017. V. 20. No. 4. P. 103–106 (in Russian).
20. Goncharova O.Y., Matyshak G.V., Timofeeva M.V., Sefilyan A.R. Assessment of the contribution of root and microbial respiration to the total efflux of CO₂ from peat soils and podzols in the north of Western Siberia by the method of component integration // *Pochvovedenie*. 2019. No. 2. P. 234–245 (in Russian). doi: 10.1134/S0032180X19020059
21. Dubrovskaya E., Pozdnyakova N., Golubev S., Muratova A., Grinev V., Bondarenkova A., Turkovskaya O. Peroxidases from root exudates of *Medicago sativa* and *Sorghum bicolor*: catalytic properties and involvement in PAH degradation // *Chemosphere*. 2017. V. 169. P. 224–232. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.027
22. Koohkan H., Mortazavi M.S., Golchin A., Najafi-Ghiri M., Golkhandan M., Akbarzadeh-Chomachaei G., Saraji F. The effect of petroleum levels on some soil biological properties under phytoremediation and bioaugmentation // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. V. 30. P. 60618–60637. doi: 10.1007/s11356-023-26730-x
23. Polyak Yu.M., Sukharevich V.I. Bioindication of soil pollution using microorganisms: advantages, limitations and potential (review) // *Agrochemistry and Ecology Problems*. 2024. No. 4. P. 55–63 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2024.39.85.007
24. Naimi O.I. The catalase activity of the ordinary chernozeme and effect of the anthropogenic factors on its level // *International Journal of Natural and Human Sciences*. 2018. No. 11–1. P. 12–15 (in Russian). doi: 10.24411/2500-1000-2018-10142

Аэробная деградация углеводородов в холодных кислых почвах: геномное профилирование бактерий-деструкторов

© 2026. А. Д. Мошкин¹, м. н. с., О. В. Охлопкова¹, к. б. н., с. н. с.,
Л. С. Адаменко¹, м. н. с., А. В. Глушков¹, м. н. с.,
А. Ю. Алексеев^{1,2}, к. б. н., ведущий научный сотрудник-руководитель лаборатории,
Р. Абдинов³, кандидат наук, с. н. с., А. А. Гаджиев², к. б. н., проректор по науке,
А. М. Шестопалов¹, д. б. н., главный научный сотрудник-директор института,
¹НИИ вирусологии, Федеральный исследовательский центр фундаментальной
и трансляционной медицины,
630060, Россия, г. Новосибирск, ул. Тимакова, д. 2,
²Дагестанский государственный университет,
367000, Россия, г. Махачкала, ул. Магомета Гаджиева, д. 43а,
³НАО Казахский научно-исследовательский институт Каспийского моря,
130000, Казахстан, г. Актау, микрорайон 4А, зд. 19,
e-mail: alex.moshkin727@gmail.com, ayalekseev@frcftm.ru

Целью данной работы является комплексное изучение микробиоты северных почв в районах вечной мерзлоты, отбор психрофильных и ацидофильных штаммов-деструкторов нефтепродуктов, а также полногеномное секвенирование выделенных бактерий для выявления ключевых генетических детерминант их биodeградационной активности. Проанализированы полногеномные последовательности шести штаммов (*Glutamicibacter creatinolyticus* GAV-1, *Lysinibacillus capsici* 5a-1, *Serratia fonticola* 16a-1/24-1/DEST-2, *Sporosarcina psychrophila* 5b-1), выделенных из нефтезагрязнённых почв (6 образцов). Филогенетическое позиционирование по 16S рРНК подтвердило отнесение изолятов к известным видам и отсутствие выраженной таксономической новизны. Сопоставление протеомов с базой HADEG с использованием Proteinortho/DIAMOND выявило резкое расслоение нефтеокисляющего потенциала: у трёх *S. fonticola* обнаружено по 19 HADEG-генов на геном (алкановые, ароматические и биосурфактантные модули), у *G. creatinolyticus* GAV-1 – 17 генов, отнесённых только к ароматическому катаболизму; у *S. psychrophila* 5b-1 – 4 ароматических гена; у *L. capsici* 5a-1 – 1 ароматический ген. В ароматическом профиле GAV-1 доминировал протокатехуатный орто-путь (7 генов) при наличии дополнительных подпутьей (фенилуксусная кислота, гомопротокатехуат, катехол, толуол). Даже внутри филогенетически «обычных» таксонов формируется существенно различный нефтеокисляющий функционал; *S. fonticola* выступают кандидатами на роль «универсальных» деструкторов, тогда как *G. creatinolyticus*, вероятно, специализирован на переработке ароматических промежуточных метаболитов, а *S. psychrophila* и *L. capsici* могут выполнять вспомогательные функции в консорциумах холодных кислых почв.

Ключевые слова: биоремедиация, нефтезагрязнённые почвы, полногеномное секвенирование, 16S рРНК, аэробная деградация углеводородов, база данных по аэробной деградации углеводородов (HADEG).

Aerobic hydrocarbon degradation in cold acidic soils: genomic profiling of hydrocarbon-degrading bacteria

© 2026. А. Д. Мошкин¹ ORCID: 0000-0002-1182-8247, О. В. Охлопкова¹ ORCID: 0000-0002-8214-7828,
Л. С. Адаменко¹ ORCID: 0000-0001-6412-3622, А. В. Глушков¹ ORCID: 0009-0004-5234-7329,
А. Ю. Алексеев^{1,2} ORCID: 0000-0003-0015-9305, Р. Абдинов³ ORCID: 0000-0001-9136-3269,
А. А. Гаджиев² ORCID: 0000-0002-7359-1951, А. М. Шестопалов¹ ORCID: 0000-0002-9734-0620,
¹Research Institute of Virology, Federal Research Center
of Fundamental and Translational Medicine,
2, Timakova St., Novosibirsk, Russia, 630060,
²Dagestan State University,
43a, Magometa Gadzhieva St., Makhachkala, Russia, 367000,

³Department of Environmental Research,
NPJSC Kazakh Scientific Research Institute of the Caspian Sea,
19, micro district 4A, Aktau, Kazakhstan, 130000,
e-mail: alex.moshkin727@gmail.com, ayalekseev@frcftm.ru

The objective of this work is to conduct a comprehensive study of the microflora of northern soils in permafrost regions, select psychrophilic and acidophilic strains that degrade petroleum products, and perform whole-genome sequencing of the isolated bacteria to identify the key genetic determinants of their biodegradation activity. The whole-genome sequences of six strains (*Glutamicibacter creatinolyticus* GAV-1, *Lysinibacillus capsici* 5a-1, *Serratia fonticola* 16a-1/24-1/DEST-2, *Sporosarcina psychrophila* 5b-1) isolated from oil-contaminated soils (6 samples). Phylogenetic positioning based on 16S rRNA confirmed the classification of the isolates into known species and the absence of significant taxonomic novelty. Comparison of proteomes with the HADEG database using Proteinortho/DIAMOND revealed a sharp stratification of oil-oxidizing potential: three *S. fonticola* strains were found to have 19 HADEG genes per genome (alkane, aromatic, and biosurfactant modules), while *G. creatinolyticus* GAV-1 had 17 genes related only to aromatic catabolism; *S. psychrophila* 5b-1 had 4 aromatic genes; *L. capsici* 5a-1 had 1 aromatic gene. The ortho pathway (7 genes) dominated the aromatic profile of GAV-1, with additional subpathways (phenylacetic acid, homoprotocatechuate, catechol, toluene). Even within phylogenetically "normal" taxa, significantly different oil-oxidizing functions are formed; *S. fonticola* are candidates for the role of "universal" destructors, while *G. creatinolyticus* is likely specialized in the processing of aromatic intermediate metabolites, and *S. psychrophila* and *L. capsici* may perform auxiliary functions in cold acidic soil consortia.

Keywords: bioremediation, oil-contaminated soils, whole-genome sequencing, 16S rRNA, aerobic degradation of hydrocarbons, Hydrocarbon Aerobic Degradation Database (HADEG).

Северные экосистемы, включая районы вечной мерзлоты, представляют собой уникальные и хрупкие экобиотопы, играющие критическую роль в глобальном климатическом балансе и сохранении биоразнообразия. Однако, активная нефтедобыча в арктических и субарктических регионах, таких как Западная Сибирь, Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа, сопровождается неизбежными аварийными разливами нефти, что приводит к долговременному загрязнению почв и водоёмов [1, 2]. Низкие температуры, высокая кислотность (pH до 3,5) и ограниченная биологическая активность в этих условиях существенно замедляют естественные процессы биodeградации углеводородов, делая традиционные методы рекультивации малоэффективными [3, 4]. По оценкам экспертов, ежегодные потери нефти составляют около 5 % от общего объёма добычи, причём значительная часть загрязнений локализуется в районах с экстремальными климатическими условиями. Такие загрязнения не только нарушают локальные экосистемы, но и способствуют накоплению токсичных метаболитов, угрожая здоровью коренных народов и усугубляя глобальные экологические кризисы [5, 6]. В этой связи поиск микроорганизмов, способных утилизировать нефтепродукты в условиях низких температур и высокой кислотности, становится ключевой задачей современной экологической микробиологии и биотехнологии.

Биоремедиация, основанная на использовании микроорганизмов-деструкторов, признана

наиболее экологически безопасным и экономически выгодным методом очистки нефтезагрязнённых территорий. Известно, что эффективность биопрепаратов напрямую зависит от адаптации штаммов к специфическим условиям среды, включая температурный режим, pH и наличие солей [7]. Однако большинство коммерчески доступных препаратов разработаны для умеренных широт и демонстрируют низкую активность в арктических регионах [1, 2, 8].

Психрофильные и ацидофильные микроорганизмы, населяющие почвы вблизи вечной мерзлоты, остаются малоизученными, несмотря на их уникальный метаболический потенциал. Современные исследования подтверждают, что штаммы *Acinetobacter*, *Pseudomonas* и *Bacillus*, выделенные из северных почв, способны деструктировать нефтепродукты при температурах до +4 °C [9]. Однако их устойчивость к экстремально низким значениям pH ($\leq 3,5$) и молекулярные механизмы адаптации до сих пор не исследованы. Кроме того, отсутствие данных полногеномного секвенирования ограничивает понимание генетического базиса их деструктивной активности и адаптационных стратегий [10].

Целью данной работы является комплексное изучение микробиоты северных почв в районах вечной мерзлоты, отбор психрофильных и ацидофильных штаммов-деструкторов нефтепродуктов, а также полногеномное секвенирование выделенных бактерий для выявления ключевых генетических детерминант их биodeградационной активности.

Объекты и методы исследования

В ходе выполнения работы был проведён отбор проб почв в районах с выраженной вечной мерзлотой и высокой естественной кислотностью (рН 3,0–3,5); выделены микроорганизмы, демонстрирующие устойчивость к низким температурам ($\leq 10^\circ\text{C}$) и способность к деградации нефтепродуктов; выполнено полногеномное секвенирование наиболее перспективных штаммов и проведена аннотация генов, связанных с метаболизмом углеводов.

Биологическим материалом послужили образцы нефтезагрязнённого грунта, полученного в ходе экспедиции сотрудников ФИЦ ФТМ к месторождениям нефти в Тазовском районе Ямало-Ненецкого автономного округа. Из почвенных образцов методом культивирования на минимальной питательной среде М9 (рН 3) с единственным источником углерода в виде нефти выделены психроацидофильные перспективные изоляты микроорганизмов – деструкторов нефти. Для определения генетических характеристик выбрано 6 изолятов.

Выделение бактериальной ДНК проводили с использованием набора для выделения геномной ДНК из клеток, тканей и крови (ООО «Биолабмикс», Россия). Для подтверждения наличия бактериальной ДНК производилась ПЦР амплификация гена 16S рРНК с применением специфических праймеров (табл. 1) и набора для ПЦР 5X ScreenMix (ЗАО «Evrogen», Россия).

Секвенирование полноразмерного генома бактерий осуществляли с помощью наборов реагентов компании ООО «БиоЛинк» (Россия): набор для ферментативной фрагментации нуклеиновых кислот; набор реагентов для подготовки NGS библиотек для платформы Illumina. Очистку кДНК проводили на магнитных частицах для очистки ДНК VANTIS DNA Clean Beads («Vazyme», Китай). Геномные библиотеки секвенировали на платформе MiSeq, Illumina с использованием «MiSeq Reagent Kit v3 600-cycle». Для выравнивания полученных прочтений на референсную последовательность использовался алгоритм BWA.

Для дальнейшего анализа использовали полногеномные последовательности шести бактериальных штаммов, выделенных из нефтезагрязнённых образцов грунта: *Glutamicibacter creatinolyticus* GAV-1, *Lysinibacillus capsici* 5a-1, *Serratia fonticola* 16a-1, 24-1 и DEST-2, а также *Sporosarcina psychrophila* 5b-1.

Структурную и функциональную аннотацию геномов выполняли с помощью программного комплекса Bakta с использованием штатной референтной базы данных bakta_db [12]. Для каждого генома строили полный набор предсказанных генов, тРНК, рРНК и других функциональных элементов в формате GFF3, а также соответствующие аминокислотные последовательности белков в формате FАА. Аннотации Bakta использовали для дальнейшего сопоставления с профильными базами данных и для извлечения координат генов 16S рРНК.

Поиск генов, вовлечённых в аэробную деградацию углеводов, проводили на основе специализированной базы HADEG (Hydrocarbon Aerobic Degradation Database, выпуск от 19.11.2023). Аминокислотные последовательности всех предсказанных белков для шести штаммов объединяли в набор протеомов, который совместно с белковой базой HADEG использовали как входные данные для анализа ортологии [13].

Сопоставление протеомов со справочными последовательностями HADEG выполняли с помощью программы Proteinortho в связке с поисковым движком DIAMOND [14, 15]. В качестве параметров использовали пороги идентичности не менее 50 % и покрытия последовательности не менее 50 % (-identity = 50, -coverage = 50), порог связанности кластеров -conn = 0,3. База HADEG была добавлена в анализ как дополнительный «протеом», что позволило идентифицировать ортологичные группы между изучаемыми штаммами и экспериментально охарактеризованными ферментами деградации углеводов.

На основании выходных таблиц Proteinortho и сопроводительных аннотаций HADEG формировали матрицу присутствия

Таблица 1 / Table 1

Праймеры, специфичные к гену 16s рРНК [11] / Primers specific to the 16s rRNA gene [11]

Название Name	Последовательность Sequence	Температура отжига, °C Annealing temperature, °C
949 16S	ACTCCTACGGGAGGCAGCAG	60
966 16S	CGACRRCCATGCANCACCT	60

генов для каждого функционального модуля и под-пути биodeградации. Постобработку данных осуществляли в среде R с использованием пакетов *dplyr*, *tidyr*, *readr*, *ggplot2*, *scales*, *reshape* и *svglite*. Для расчёта сводных таблиц и построения визуализаций адаптировали скрипт *HADEG.R* из открытого репозитория разработчиков базы *HADEG*. В тепловой карте отражено наличие и количество ортологов отдельных ферментов, тогда как на пузырьковой диаграмме отражено число генов по отдельным под-путям деградации алканов и ароматических углеводов.

Для филогенетического анализа использовали последовательности гена 16S рРНК, извлечённые из аннотированных геномов. Координаты генов 16S рРНК определяли по GFF3-файлам *Bakta*, отбирая записи типа *rRNA* с аннотацией продукта «16S ribosomal RNA». По этим координатам вырезали соответствующие нуклеотидные последовательности из геномных FASTA-файлов с помощью утилиты *bedtools getfasta*. Для каждого штамма формировали отдельный FASTA-файл, содержащий консенсусную последовательность 16S рРНК.

Для придания дереву таксономического контекста к набору последовательностей исследуемых штаммов добавляли референсные 16S рРНК близкородственных и типовых штаммов, полученные из базы *GenBank* (NCBI). Совокупный набор последовательностей выравнивали с применением программы *ClustalW* в автоматическом режиме подбора алгоритма с учётом ориентации последовательностей.

Полученное множественное выравнивание очищали от слабо выровненных и сильно вариабельных позиций. На основе выравнивания строили филогенетическое дерево методом максимального правдоподобия с применением пакета *IQ-TREE 2*. Для выбора оптимальной модели эволюции нуклеотидов использовали процедуру автоматического подбора моделей (опция *-m MFP*). Надёжность ветвей оценивали с помощью 1000 итераций бутстрэп-анализа. Дальнейшую визуализацию и аннотирование дерева выполняли в программе *FigTree*. Штаммы, выделенные в данной работе, были дополнительно отмечены цветом и подписью.

Результаты и обсуждение

Анализ последовательностей гена 16S рРНК показал, что все выделенные из хо-

лодных и кислых нефтезагрязнённых почв изоляты укладываются в рамки уже описанных бактериальных таксонов (рис. 1). Три штамма, предварительно отнесённые к виду *S. fonticola* (16a-1, 24-1 и DEST-2), формировали компактную, хорошо поддержанную кладу, группирующуюся с типовыми и близкородственными штаммами *S. fonticola*. Внутригрупповая дивергенция по 16S-последовательности между этими тремя изолятами была минимальной, что указывает на внутривидовой уровень различий при наличии более выраженной вариабельности на уровне функционального генома.

Штамм *Glutamicibacter creatinolyticus* GAV-1 кластеризовался с криоадаптированными представителями рода *Glutamicibacter*. *Lysinibacillus capsici* 5a-1 занимал положение внутри клады *Lysinibacillus*, связанной преимущественно с почвенными и ризосферными нишами. Психрофильный изолят *S. psychrophila* 5b-1 располагался в пределах клады психрофильных представителей рода *Sporosarcina*. Таким образом, все штаммы являются филогенетически «обычными» представителями своих родов, однако происходят из специфической экосистемы холодных и кислых нефтезагрязнённых почв.

Сопоставление протеомов с курированной базой *HADEG* выявило наличие у всех шести штаммов генов, гомологичных экспериментально охарактеризованным ферментам деградации углеводов. Обобщённое распределение числа таких генов по геномам и функциональным категориям представлено на тепловой карте (рис. 2, см. цв. вкладку V).

У всех трёх штаммов *S. fonticola* (16a-1, 24-1 и DEST-2) был обнаружен идентичный набор *HADEG*-генов: по 3 гена, относящихся к алкановым путям (*A_Alkanes*), 15 генов, связанных с ароматическим катаболизмом (*C_Aromatics*), и по одному гену, отнесённому к категории биосурфактантов (*D_Biosurfactants*). В сумме каждый геном содержал по 19 *HADEG*-генов, что делает именно *S. fonticola* наиболее насыщенными по нефтеокисляющему функционалу из исследованных штаммов. На тепловой карте это проявляется в виде высоких значений как в алкановой, так и в ароматической категориях для всех трёх геномов.

Геном *G. creatinolyticus* GAV-1 содержал 17 *HADEG*-генов, причём все они были отнесены к категории *C_Aromatics*; алкановые и биосурфактантные гены, детектируемые в рамках *HADEG*, в этом геноме не выявлены.

**А. Д. Мошкин, О. В. Охлопкова, Л. С. Адаменко, А. В. Глушков,
А. Ю. Алексеев, Р. Абдинов, А. А. Гаджиев, А. М. Шестопалов
«Аэробная деградация углеводов в холодных кислых почвах:
геномное профилирование бактерий-деструкторов». С.164.**

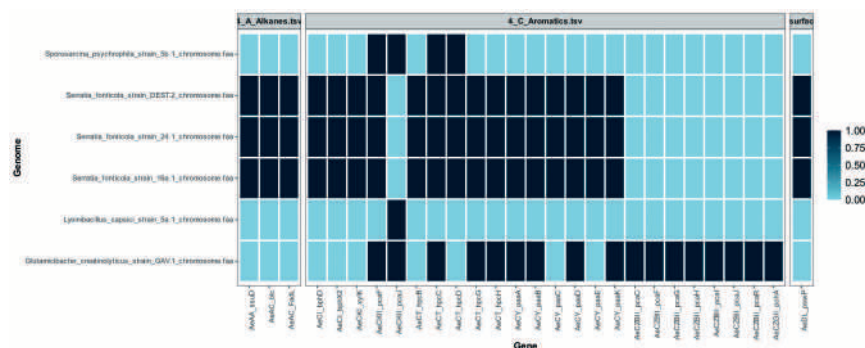


Рис. 2. Тепловая карта распределения числа генов, аннотированных по базе HADEG, по штаммам и функциональным категориям. Цветовая шкала отражает количество генов, отнесённых к соответствующему пути в каждом геноме

Fig. 2. Heatmap of the distribution of the number of genes annotated in the HADEG database by strain and functional category. The color scale reflects the number of genes assigned to the corresponding pathway in each genome

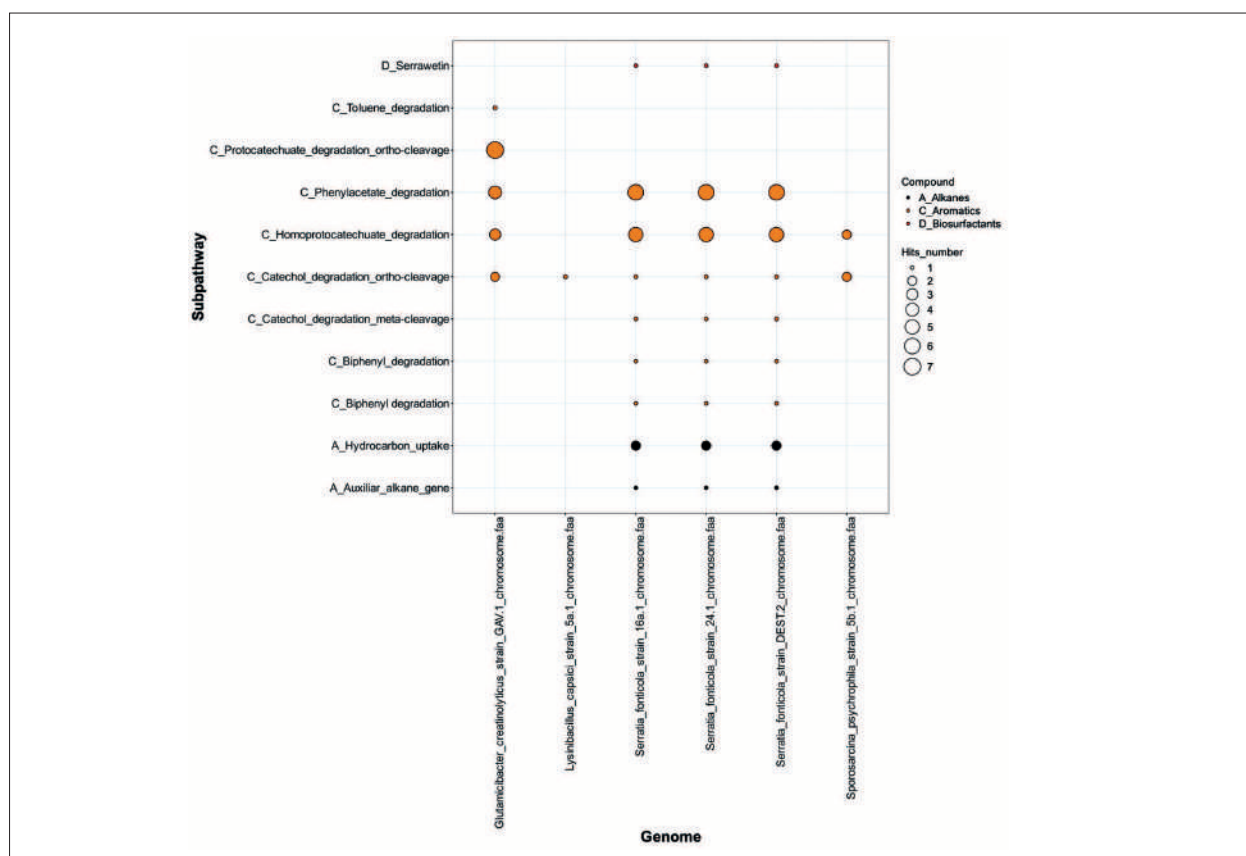


Рис. 3. Пузырьковая диаграмма распределения генов, аннотированных по базе HADEG, по подпутиям (Subpathways) и геномам. По оси X – подпути, по оси Y – геномы; размер пузыря пропорционален числу генов, относящихся к соответствующему подпути в данном геноме

Fig. 3. Bubble plot of the distribution of genes annotated with the HADEG database by subpathways and genomes. The x-axis represents subpathways, the y-axis represents genomes; the bubble size is proportional to the number of genes belonging to the corresponding subpathway in a given genome

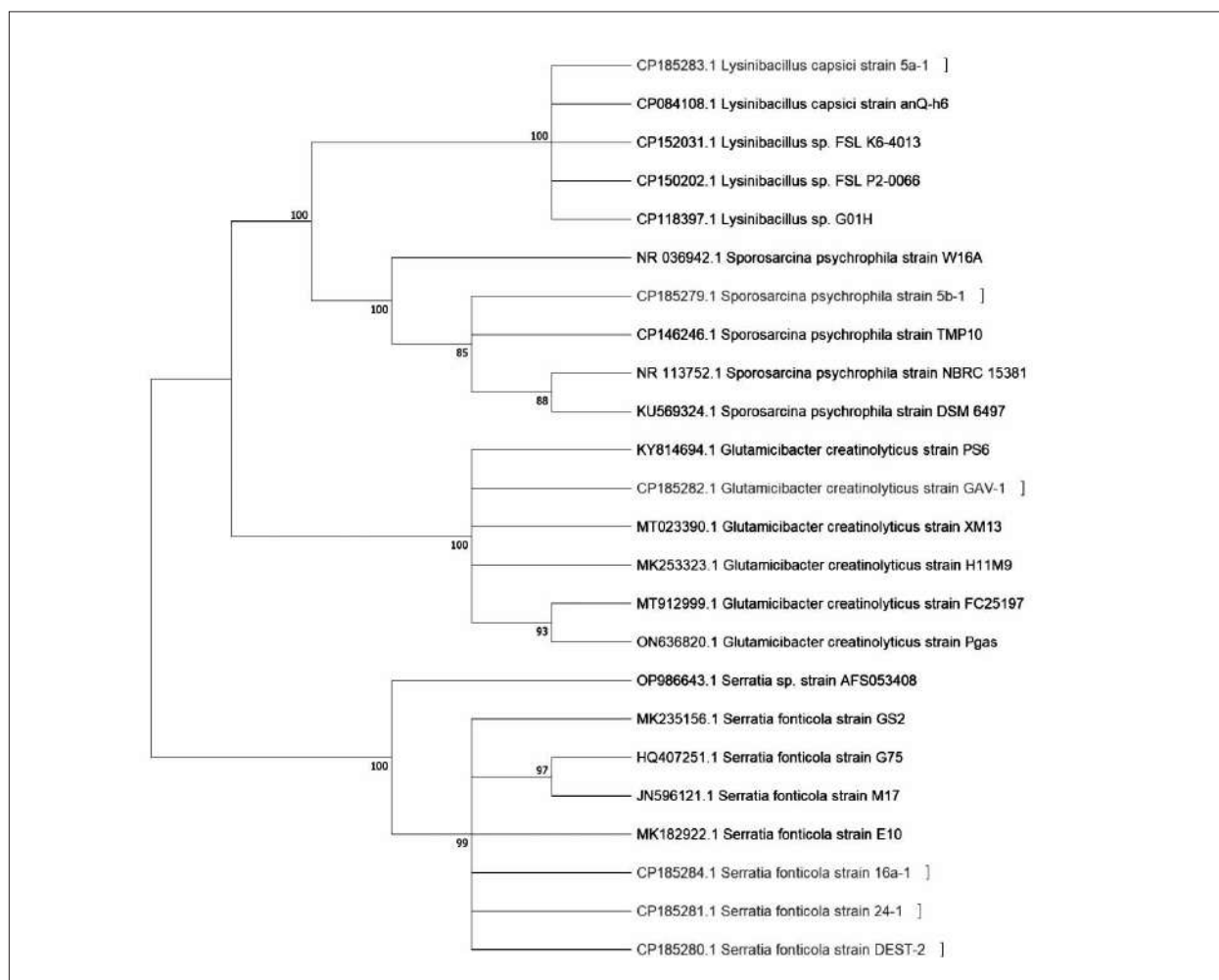


Рис. 1. Филогенетическое дерево, построенное по последовательностям гена 16S рРНК для выделенных штаммов и референсных последовательностей
Fig. 1. Phylogenetic tree constructed from 16S rRNA gene sequences for isolated strains and reference sequences

У *S. psychrophila* 5b-1 обнаружено 4 ароматических НАДЕГ-гена, а у *L. capsici* 5a-1 – только один ароматический ген. На тепловой карте эти штаммы представлены меньшей интенсивностью сигнала и отсутствием алкановых и биосурфактантных модулей, что указывает на резко отличающийся уровень «вложений» в углеводородный катаболизм по сравнению с *S. fonticola* и *G. creatinolyticus*.

Таким образом, тепловая карта (рис. 2) демонстрирует выраженный градиент насыщенности НАДЕГ-генами: от максимально нагруженных профилей *S. fonticola* (и в несколько меньшей степени *G. creatinolyticus*) до крайне ограниченных наборов у *S. psychrophila* и *L. capsici*.

Более детализированное распределение НАДЕГ-генов по отдельным подпутям представлено на пузырьковой диаграмме (рис. 3, см. цв. вкладку V). Размер пузыря в каждой точке отражает количество генов, отнесённых к соответствующему под-пути в конкретном геноме.

У *G. creatinolyticus* GAV-1 ароматический функционал включает пять подпутей. Наиболее представленным является протокатехуатный орто-путь (C_Protocatechuate_degradation_ortho-cleavage, 7 генов), далее следуют пути деградации фенилуксусной кислоты (C_Phenylacetate_degradation, 4 гена) и гомопротокатехуата (C_Homoprotocatechuate_degradation, 3 гена). Катехольный орто-путь (C_Catechol_degradation_ortho-cleavage) представлен двумя генами, путь деградации толуола (C_Toluene_degradation) – одним. На рисунке 3 это соответствует крупным пузырям в зоне центральных ароматических подпутей при отсутствии сигналов в алкановой и биосурфактантной областях.

У *S. psychrophila* 5b-1 выявлены два подпути, каждый по два гена: C_Catechol_degradation_ortho-cleavage и C_Homoprotocatechuate_degradation. Профиль *L. capsici* 5a-1 ещё более минима-

лен: обнаружен один ген, относящийся к C_Catechol_degradation_ortho-cleavage. На пузырьковой диаграмме оба штамма представлены небольшими одиночными пузырями в области центральных ароматических путей.

Во всех трёх геномах *S. fonticola* (16a-1, 24-1, DEST-2) зафиксирована одинаковая конфигурация подпутей. Алкановый блок представлен подпутями A_Auxiliar_alkane_gene (1 ген) и A_Hydrocarbon_uptake (2 гена), суммарно дающими три алкановых НАДЕГ-гена. Ароматический блок включает модуль деградации бифенила (C_Biphenyl_degradation, 2 гена), катехольные мета- и орто-пути (C_Catechol_degradation_meta-cleavage и C_Catechol_degradation_ortho-cleavage, по 1 гену каждого типа), путь деградации гомопротокатехуата (5 генов) и фенилуксусной кислоты (6 генов). Биосурфактантный модуль представлен путём синтеза серраветина (D_Serrawetin, 1 ген). На рисунке 3 это проявляется как множество пузырей средней и крупной величины, распределённых как в алкановой, так и в ароматической и биосурфактантной зонах, что подчёркивает комплексный характер нефтеокисляющего функционала *S. fonticola*.

В совокупности данные, представленные на тепловой карте (рис. 2) и пузырьковой диаграмме (рис. 3), показывают, что *S. fonticola* обладают наиболее широким и сбалансированным набором путей деградации углеводородов, тогда как *G. creatinolyticus* специализируется преимущественно на ароматических субстратах, а *S. psychrophila* и *L. capsici* несут минимальные и, вероятно, вспомогательные наборы ароматических подпутей.

Сопоставление данных по 16S-филогении с наличием НАДЕГ-генов показывает, что в пределах относительно узких филогенетических рамок может формироваться весьма различный нефтеокисляющий потенциал. Три штамма *S. fonticola* практически не различаются по последовательности гена 16S рРНК, однако несут одинаковый и при этом максимально насыщенный по сравнению с другими изолятами набор генов деградации углеводородов – по 19 НАДЕГ-генов на геном, включая как алкановые, так и многочисленные ароматические подпути и биосурфактантный модуль. Это согласуется с представлением о том, что эволюционное «наращивание» катаболических возможностей происходит преимущественно за счёт приобретения и перестройки отдельных генетических модулей (островов деградации, плазмид и т. п.)

при сохранении консервативной структуры «домашнего» генома.

Грамположительные штаммы демонстрируют противоположную картину: *G. creatinolyticus* GAV-1, *S. psychrophila* 5b-1 и *L. capsici* 5a-1 занимают ожидаемые позиции в 16S-дереве, однако их нефтеокисляющий функционал значительно более скромный. У GAV-1 присутствует относительно широкий, но исключительно ароматический набор (17 генов, распределённых по пяти подпутям), у *S. psychrophila* – лишь четыре гена в двух подпутях, а у *L. capsici* найден единственный катехольный орто-ген. Такое расслоение по уровню и структуре катаболического потенциала при общей экологической принадлежности штаммов к нефтезагрязнённым холодным и кислым почвам указывает на наличие функциональной специализации внутри сообщества, которая не просматривается на уровне маркёрного гена 16S рРНК.

Полученные данные позволяют по-разному трактовать вклад каждого изолята в деградацию нефти в природных условиях. *Serratia fonticola* обладают наиболее «полным» нефтеокисляющим профилем. Сочетание алкановых путей (вспомогательные гены и модуль захвата углеводов), развитой системы деградации ароматических соединений (бифенил, фенилуксусная кислота, гомопротокатехуат, катехольные мета- и орто-пути) и наличие биосурфактантного пути (серраветин) делает их типичными кандидатами в «универсальные» нефтеокислители. Такие штаммы потенциально способны инициировать и поддерживать разложение как алифатической, так и ароматической фракций нефти, а также повышать доступность гидрофобных субстратов за счёт серраветина.

В отличие от них, *G. creatinolyticus* GAV-1 обладает богатым, но сугубо ароматическим деградационным путём: ярко выраженный протокатехуатный орто-путь, подкреплённый путями деградации фенилуксусной кислоты, гомопротокатехуата, катехольным орто-путём и отдельным модулем деградации толуола, указывает на специализацию на переработке разнообразных ароматических метаболитов. При отсутствии в геноме детектируемых алкановых модулей такой штамм, вероятно, играет роль «центрального переработчика» ароматических промежуточных продуктов, возникающих при первичном окислении углеводородов другими членами консорциума.

Sporosarcina psychrophila 5b-1 и *L. capsici* 5a-1 демонстрируют ещё более узкую специали-

зацию. Первый имеет лишь два подпути (катехольный орто- и гомопротокатехуатный), представленные по двум генам каждый, второй – единственный катехольный орто-ген. Такие профили типичны для организмов, вовлечённых в переработку ограниченного набора промежуточных метаболитов, а не исходных компонентов нефти. Тем не менее, учитывая психрофильный характер *S. psychrophila* и способность *L. capsici* существовать в кислых почвах, их вклад в устойчивость сообщества к экстремальным условиям среды может быть значим, даже при относительно скромном наборе катаболических генов.

Присутствие алкановых и биосурфактантных модулей только у *S. fonticola* подчёркивает их потенциальную ключевую роль в начальных этапах деградации нефти. Наличие вспомогательных алкановых генов и систем захвата углеводов говорит о способности этих штаммов не только окислять н-алканы, но и эффективно транспортировать их в клетку. Ген серраветина в каждом из трёх геномов указывает на возможность синтеза поверхностно-активных соединений, способных эмульгировать нефть и облегчать её биодоступность как самим продуцентам, так и другим участникам консорциума. В условиях низкой температуры и кислой реакции среды, где физико-химическое перемешивание ограничено, такой механизм может иметь ключевое значение для запуска процессов биodeградации нефти.

Интерпретация полученных данных неизбежно опирается на ортологическое сопоставление с базой HADEG и, как следствие, ограничена рамками уже описанных экспериментально охарактеризованных ферментов. В геномах исследованных штаммов могут присутствовать дополнительные гены, вовлечённые в деградацию нефти, которые не попали в анализ из-за отсутствия тесных гомологов в базе. Кроме того, наличие гена не гарантирует его экспрессию и функциональную активность *in situ*.

Заключение

Комплексный анализ шести бактериальных штаммов, выделенных из холодных и кислых нефтезагрязнённых почв, показал, что даже в пределах хорошо известных таксонов может формироваться существенно различный нефтеокисляющий потенциал. Филогенетическое позиционирование по гену 16S рРНК подтвердило принадлеж-

ность изолятов к видам *Serratia fonticola*, *Glutamicibacter creatinolyticus*, *Lysinibacillus capsici* и *Sporosarcina psychrophila* и не выявило признаков глубокой таксономической новизны. При этом сопоставление протеомов с базой HADEG продемонстрировало выраженное расслоение по структуре катаболического пути: от максимально насыщенных профилей *S. fonticola* (19 HADEG-генов на геном, включающих алкановые, ароматические и биосурфактантные пути) до крайне ограниченных наборов у *S. psychrophila* и *L. capsici*.

Serratia fonticola выделяются как потенциально универсальные нефтеокислители, сочетающие в себе алкановые модули, развитую сеть ароматических подпутей и биосурфактантный путь серраветина. *Glutamicibacter creatinolyticus* GAV-1 демонстрирует богатый, но преимущественно ароматический путь и, вероятно, играет роль центрального переработчика ароматических метаболитов. Психрофильный *S. psychrophila* 5b-1 и *L. capsici* 5a-1 обладают минимальным набором катехольных и родственных путей и, по-видимому, выполняют вспомогательные функции в составе микробных консорциумов.

Таким образом, природные микробные сообщества холодных и кислых почв представляют собой мозаичную систему, в которой филогенетически привычные бактерии распределяют между собой функции по деградации различных фракций нефти. Полногеномный подход с использованием специализированных баз данных, таких как HADEG, позволяет перейти от описания отдельных «штаммов-деструкторов» к пониманию того, какие именно метаболические модули они привносят в сообщество и как эти модули дополняют друг друга. Эти данные создают основу для рационального подбора сочетаний штаммов при разработке биопрепаратов, ориентированных на очистку холодных и кислых экосистем от нефтяного загрязнения, и задают направление для дальнейших работ по интеграции геномного анализа с экспериментальными оценками активности путей деградации углеводов *in situ*.

Работы выполнены в рамках государственного задания НИИ вирусологии ФИЦ ФТМ №125031903984-1.

Литература

1. Алексеев А.Ю., Забелин В.А., Куц С.А., Пушкарёв Н.С. Практика биологической рекультивации // Нефтяное хозяйство. 2006. № 12. С. 98–99.

2. Емельянова Е.К., Алексеев А.Ю., Мокеева А.В., Тарасова М.В., Шестопалов М.А., Карпова Е.В., Забелин В.А., Шестопалов А.М., Ильичева Т.Н. Биореккультивация загрязненных нефтью объектов в Тюменской области // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Биология, клиническая медицина. 2010. Т. 8. Вып. 4. С. 155–161.

3. Васильев А.В. Использование биосорбентов для очистки почв и водных объектов от нефтяных загрязнений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2024. № 26 (122). С. 164–174. doi: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-164-174

4. Адаменко Л.С., Алексеев А.Ю., Забелин В.А., Филатов Д.А., Шаршов К.А., Шестопалов А.М. Метод утилизации нефтяных разливов с водной поверхности с применением сорбента на основе мультиграфена и микробного препарата в приближенных к естественным условиям // Экологический вестник России. 2014. № 3. С. 32–34.

5. Chapman P., Wade T.L., Knap A.H. Environmental effects and management of oil spills on marine ecosystems // Environmental Management of Marine Ecosystems / Eds. M.N. Islam, S.E. Jorgensen. Boca Raton: CRC Press, 2018. P. 119–146. doi: 10.1201/9781315153933-5

6. Алексеев А.Ю., Адаменко Л.С., Забелин В.А., Макачук А.Л., Шестопалов А.М. Биоремедиация загрязненных нефтепродуктами территорий как основа системы мероприятий для улучшения среды обитания человека на севере Сибири // Якутский медицинский журнал. 2016. № 2 (54). С. 44–46.

7. Ветрова А.А., Забелин В.А., Иванова А.А., Адаменко Л.А., Делеган Я.А., Петриков К.В. Биодegradация нефти консорциумом штаммов-нефтедеструкторов в лабораторных модельных системах // Юг России: экология, развитие. 2018. № 13 (1). С. 184–198. doi: 10.18470/1992-1098-2018-1-184-198

8. Fan M.-Y., Xie R.-J., Qin G. Bioremediation of petroleum-contaminated soil by a combined system of biostimulation-bioaugmentation with yeast // Environmental Technology. 2014. V. 35. No. 1–4. P. 391–399. doi: 10.1080/09593330.2013.829504

9. Мокеева А.В., Алексеев А.Ю., Емельянова Е.К., Забелин В.А., Заушинцева А.В., Тараканова А.С., Шестопалов А.М., Ильичева Т.Н. Ассоциация штаммов бактерий-нефтедеструкторов для ремедиации нефтезагрязненных территорий // Вестник НГУ. Серия: Биология, клиническая медицина. 2011. Т. 9. № 3. С. 27–34.

10. Сидоренко М.Л., Русакова Д.А. Разнообразие психрофильных бактерий и их биотехнологический потенциал (обзор) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2022. № 58. С. 28–54. doi: 10.17223/19988591/58/2

11. Drewes J.L., White J.R., Dejea C.M., Fathi P., Iyadorai T., Vadivelu J., Roslani A.C., Wick E.C., Mongodin E.F., Loke M.F., Thulasi K., Gan H.M., Goh K.L., Chong H.Y., Kumar S., Wanyiri J.W., Sears C.L. High-

resolution bacterial 16S rRNA gene profile meta-analysis and biofilm status reveal common colorectal cancer consortia // Biofilms Microbiomes. 2017. V. 3. Article No. 34. doi: 10.1038/s41522-017-0040-3

12. Schwengers O., Jelonek L., Dieckmann M.A., Beyvers S., Blom J., Goesmann A. Bakta: rapid and standardized annotation of bacterial genomes via alignment-free sequence identification // Microbial Genomics. 2021. V. 7. No. 11. Article No. 000685. doi: 10.1099/mgen.0.000685

13. Rojas-Vargas J., Castelán-Sánchez H.G., Pardo-López L. HADEG: A curated hydrocarbon aerobic degradation enzymes and genes database // Computational Biology and Chemistry. 2023. V. 107. Article No. 107966. doi: 10.1016/j.compbiolchem.2023.107966

14. Lechner M., Findeiss S., Steiner L., Marz M., Stadler P.F., Prohaska S.J. Proteinortho: detection of (Co-) orthologs in large-scale analysis // BMC Bioinformatics. 2011. V. 12. Article No. 124. doi: 10.1186/1471-2105-12-124

15. Buchfink B., Reuter K., Drost H.-G. Sensitive protein alignments at tree-of-life scale using DIAMOND // Nature Methods. 2021. V. 18. No. 4. P. 366–368. doi: 10.1038/s41592-021-01101-x

References

1. Alekseev A.Yu., Zabelin V.A., Kuts S.A., Pushkarev N.S. Practice of biological reclamation // Oil Industry. 2006. No. 12. P. 98–99 (in Russian).

2. Emel'yanova E.K., Alekseev A.Yu., Mokeeva A.V., Tarasova M.V., Shestopalov M.A., Karpova E.V., Zabelin V.A., Shestopalov A.M., Il'icheva T.N. Bioremediation of oil-contaminated sites in the Tyumen Region // Vestnik of Novosibirsk State University. Series: Biology, Clinical Medicine. 2010. V. 8. No. 4. P. 155–161 (in Russian).

3. Vasil'ev A.V. Use of biosorbents for purification of soils and water bodies from oil pollution // Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2024. No. 6 (122). P. 164–174 (in Russian). doi: 10.37313/1990-5378-2024-26-6-164-174

4. Adamenko L.S., Alekseev A.Yu., Zabelin V.A., Filatov D.A., Sharshov K.A., Shestopalov A.M. Method for the disposal of oil spills from the water surface using a multigraphene-based sorbent and a microbial preparation under conditions close to natural // Ecological Bulletin of Russia. 2014. No. 3. P. 28–30 (in Russian).

5. Chapman P., Wade T.L., Knap A.H. Environmental effects and management of oil spills on marine ecosystems // Environmental Management of Marine Ecosystems / Eds. M.N. Islam, S.E. Jorgensen. Boca Raton: CRC Press, 2018. P. 119–146. doi: 10.1201/9781315153933-5

6. Alekseev A.Yu., Adamenko L.S., Zabelin V.A., Makarchuk A.L., Shestopalov A.M. Bioremediation of oil contaminated areas as a basis for a system of measures to improve the human environment in Northern Siberia // Yakut Medical Journal. 2016. No. 2 (54). P. 44–46 (in Russian).

7. Vetrova A.A., Zabelin V.A., Ivanova A.A., Adamenko L.A., Delean Ya.A., Petrikov K.V. Oil biodegradation by consortium of oil degrading microorganisms in laboratory model systems // *South of Russia: Ecology, Development*. 2018. No. 13(1). P. 184–198 (in Russian) doi: 10.18470/1992-1098-2018-1-184-198
8. Fan M.-Y., Xie R.-J., Qin G. Bioremediation of petroleum-contaminated soil by a combined system of biostimulation-bioaugmentation with yeast // *Environmental Technology*. 2014. V. 35. No. 4. P. 391–399. doi: 10.1080/09593330.2013.829504
9. Mokeeva A.V., Alekseev A.Yu., Emelyanova E.K., Zabelin V.A., Zaushintsena A.V., Tarakanova A.S., Sheshtopalov A.M., Ilyicheva T.N. Association of oil destructor microorganism strains for remediation of petropolluted territories // *Vestnik of Novosibirsk State University. Series: Biology, Clinical Medicine*. 2011. V. 9. No. 3. P. 27–34 (in Russian).
10. Sidorenko M.L., Rusakova D.A. Diversity of psychrophilic bacteria and their biotechnological potential (review) // *Tomsk State University Journal of Biology*. 2022. No. 58. P. 28–54 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/58/2
11. Drewes J.L., White J.R., Dejea C.M., Fathi P., Iyadorai T., Vadivelu J., Roslani A.C., Wick E.C., Mongodina E.F., Loke M.F., Thulasi K., Gan H.M., Goh K.L., Chong H.Y., Kumar S., Wanyiri J.W., Sears C.L. High-resolution bacterial 16S rRNA gene profile meta-analysis and biofilm status reveal common colorectal cancer consortia // *Biofilms Microbiomes*. 2017. V. 3. Article No. 34. doi: 10.1038/s41522-017-0040-3
12. Schwengers O., Jelonek L., Dieckmann M.A., Beyvers S., Blom J., Goesmann A. Bakta: rapid and standardized annotation of bacterial genomes via alignment-free sequence identification // *Microbial Genomics*. 2021. V. 7. No. 11. Article No. 000685. doi: 10.1099/mgen.0.000685
13. Rojas-Vargas J., Castelán-Sánchez H.G., Pardo-López L. HADEG: A curated hydrocarbon aerobic degradation enzymes and genes database // *Computational Biology and Chemistry*. 2023. V. 107. Article No. 107966. doi: 10.1016/j.compbiolchem.2023.107966
14. Lechner M., Findeiss S., Steiner L., Marz M., Stadler P.F., Prohaska S.J. Proteinortho: detection of (Co-) orthologs in large-scale analysis // *BMC Bioinformatics*. 2011. V. 12. Article No. 124. doi: 10.1186/1471-2105-12-124
15. Buchfink B., Reuter K., Drost H.-G. Sensitive protein alignments at tree-of-life scale using DIAMOND // *Nature Methods*. 2021. V. 18. No. 4. P. 366–368. doi: 10.1038/s41592-021-01101-x

Лесомелиоративная оценка защищённости сельскохозяйственных угодий в сухостепной природной зоне

© 2026. А. А. Выприцкий, м. н. с., А. А. Хованская, лаборант-исследователь,
Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного
лесоразведения Российской академии наук,
400062, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97,
e-mail: vyprickiy-a@vfanc.ru

В условиях сухостепной природной зоны каштановые почвы слабогумусированы и не имеют значительных запасов питательных элементов, в связи с чем любой вид их деградации приводит к резкому снижению продуктивности. Лесомелиорация является важнейшим инструментом защиты агролесоландшафтов от воздействия негативных факторов. В условиях сухой степи для лесных насаждений требуются регулярные лесоводственные уходы, при отсутствии которых в настоящее время наблюдается снижение их сохранности вплоть до полного распада лесомелиоративных систем. В связи с этим анализ сохранности таких систем с определением их пространственного размещения даёт возможность разработать картографические модели восстановления защитных лесомелиоративных насаждений. Используемое понятие лесомелиоративной защищённости предполагает определение соответствия конструкции, размещения и сохранности полезащитных лесных полос (ПЗЛП) лесомелиоративным нормам. Решение этой задачи в работе проведено методами геоинформационного анализа данных дистанционного зондирования Земли. В исследовании рассматриваются пахотные и залежные земли Михайловского района Алтайского края. Полученные результаты в ходе векторизации обрабатываемых земель коррелируют со статистическими данными на 97,5 %. Оценка современного состояния ПЗЛП осуществлена с использованием ГИС технологий и продуктов для оценки лесной растительности – ESRI Land Cover, Global Forest Change (GFC), вегетационного индекса NDVI и канала «красный» снимков сверхвысокого пространственного разрешения (Maxar). Проведена оценка точности результатов на тестовом участке для наиболее подходящих для исследования продуктов (NDVI – 68 %, классификация по «красному» каналу – 86 %). Выявлено, что 71721,5 га площади пахотных земель не защищены ПЗЛП.

Ключевые слова: лесные насаждения, сельскохозяйственные угодья, агролесомелиорация, дистанционное зондирование Земли.

Forest reclamation assessment of the protection of agricultural lands in the dry steppe natural zone

© 2026. A. A. Vypritskiy ORCID: 0000-0002-3095-6834, A. A. Khovanskaya ORCID: 0009-0006-8957-241X,
Federal Scientific Center for Agroecology, Integrated Land Reclamation and Protective
Afforestation of the Russian Academy of Sciences,
97, Universitetskii Ave., Volgograd, Russia, 400062,
e-mail: vyprickiy-a@vfanc.ru

Forest reclamation is an essential tool to protect agroforestry landscapes from negative impacts. However, forest reclamation plantations function only in compliance with the standards of placement and design, which primarily depends on the soil and geomorphological characteristics of the landscape. In the dry steppe, forest plantations require regular silvicultural care, in the absence of which their conservation is currently decreasing up to the complete collapse of forest reclamation systems. In this regard, the analysis of the preservation of such systems with the definition of their spatial location makes it possible to develop cartographic models for the restoration of protective forest reclamation plantations. The solution of this problem in this work was carried out using methods of geoinformation analysis of Earth remote sensing data. The study examines the arable and fallow lands of the Mikhailovskiy district of the Altai Krai. The results obtained during vectorization correlate with statistical data by 97.5 %. **The study uses 4 products to assess the actual state of the forest shelter-belts** – ESRI Land Cover, Global Forest Change (GFC), NDVI, classification by the “red” channel of ultra-high spatial resolution images. The accuracy of the results in the test area for the most suitable products for research was assessed (NDVI – 68 %, classification by the “red” channel – 86 %). It was revealed that 71,721.5 ha of arable lands are unprotected by the forest shelter-belts. The results obtained can be used for the further development of agroforestry complexes.

Keywords: forest plantations, agricultural lands, agroforestry, remote sensing.

Нерациональное природопользование отрицательно влияет на состояние почв. Обработанные земли подвержены деградации в результате ветровой (дефляции) и водной эрозии. Для предотвращения деградации земель, используемых для выращивания сельскохозяйственных культур, разрабатывают комплексы полезащитных лесных полос (ПЗЛП). В сухостепной географической зоне для защиты земель от деградации проектируются и создаются полезащитные и противоэрозионные (стокорегулирующие, прибалочные и приовражные) лесные насаждения соответствующей конструкции, учитывающие особенности характеристик территории. Полезащитные лесные полосы обеспечивают снижение скорости ветра, обеспечивая защиту полей от дефляции, а противоэрозионные полосы регулируют сток и предотвращают линейную и плоскостную эрозию. При этом сохраняется влажность почвы, улучшается микроклимат, задерживается снежный покров, обеспечивается защита от суховея и пыльных бурь [1].

Алтайский край является одним из сельскохозяйственных регионов страны, посевная площадь на территории края составляет более 5,3 млн га (по данным федеральной службы государственной статистики по Алтайскому краю и Республике Алтай) [2, 3]. Михайловский район, площадь которого составляет 3113 км², находится на юго-западе края. Район граничит с Ключевским, Волчихинским и Угловским районами, а также Республикой Казахстан. Исследуемая территория находится в зоне сухой степи в пределах Кулундинской равнины с резко континентальным климатом: тёплым летом – средняя температура июля +21 °С и недостаточным увлажнением почв – среднегодовые осадки составляют 250 мм, более 70 % которых приходится на тёплый период [4]. В районе полностью отсутствует речная сеть, а часть территорий занимают солёные и солёно-горькие озёра. В Михайловском районе преобладают тёмно-каштановые, каштановые почвы и солонцы преимущественно легкосуглинистого и супесчаного гранулометрического состава, на юге района в ленточном бору преобладают боровые пески [5].

Защищённость сельскохозяйственных угодий лесными насаждениями является одним из главных факторов в поддержании продуктивности почв и уменьшении влияния процессов эрозии и дефляции на состояние пахотных земель [6]. Состояние, сохранность, породный состав и возраст древостоя в ПЗЛП

на территории Алтайского края и отдельных его районов изучались и ранее, но данные на настоящий момент не актуализированы [1, 7]. Следует отметить, что в ранее проведённых исследованиях не применялись методы с применением геоинформационного картографирования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), научные работы строились на обработке статистических данных и полевых исследованиях.

Целью работы является оценка защищённости лесными насаждениями сельскохозяйственных угодий Михайловского района Алтайского края в настоящее время.

Материалы и методы исследования

Анализ состояния защитных лесных насаждений показал, что ПЗЛП на территории Михайловского района Алтайского края достигли предельного возраста и не способны эффективно выполнять защитные функции [1]. Стоит отметить, что в Лесном плане отсутствуют статистические данные по площадям ПЗЛП, в связи с тем, что большая их часть размещена на землях сельскохозяйственного назначения. В настоящее время это является проблемой, не позволяющей актуализировать данные по состоянию ПЗЛП. Использование технологий с применением геоинформационных систем (ГИС) для анализа и картографирования лесных насаждений по данным ДЗЗ позволяет получить современные данные об их сохранности.

Объектом исследования являются сельскохозяйственные угодья и защитные лесные насаждения на территории Михайловского района Алтайского края. Предмет исследования – современная агролесомелиоративная защищённость сельскохозяйственных угодий.

Территория Михайловского района характеризуется большой степенью распаханности земель в неблагоприятных для ведения сельского хозяйства почвенно-климатических условиях. По открытым статистическим данным [2], площадь пахотных земель на 2016 г. составляла 95801,3 га, площадь залежей – 259,7 га. Согласно Л.В. Лебедевой и Н.М. Лучниковой [8], площадь обрабатываемых земель на территории исследования составляет 96775,4 га. Более 30 % площади района занимают сельскохозяйственные угодья (пахотные и залежные земли). Район находится в зоне недостаточного увлажнения – это означает, что урожай сельскохозяйственных культур зависит от количества осадков

в период вегетации. Наибольшую посевную площадь, по данным 2016 г., занимали зерновые и зернобобовые культуры: пшеница, рожь, ячмень, овёс, кукуруза на зерно, просо, гречиха, горох – 44486 га. На технические культуры (подсолнечник и картофель) приходилось 23176 га, на кормовые культуры – 13258 га, на овощные и бахчевые культуры – 220 га [2].

Картографирование границ сельскохозяйственных угодий и проектной площади ПЗЛП проводились в ГИС QGIS 3.40 с использованием космоснимков сверхвысокого пространственного разрешения провайдера Махаг. Для сравнения ретроспективных данных об используемых землях (карты пахотных земель, на основе данных спутника Landsat-5, 1989 г.) на территории исследования применялись снимки со спутников Landsat-8, 9 в комбинации каналов RGB (4,3,2) (на 01.08.2024).

Для расчёта фактической площади полога ПЗЛП были использованы 4 продукта: 1) открытый источник данных ESRI Land Cover, предоставляющий ежегодную карту ландшафтов Земли с 2017 по 2023 гг., основанную на космических снимках спутников Sentinel-2 пространственного разрешения 10 м [9]; 2) данные Global Forest Change (GFC), основанные на космических снимках спутника Landsat на 2000 г. и имеющие информацию о территориях с потерей лесного покрова в период с 2000 по 2019 гг., пространственного разрешения 15 м [10]; 3) спутниковые снимки высокого разрешения (10 м) второго уровня обработки после коррекции атмосферных искажений Sentinel-2, полученные с сервиса «Bera-Science» [11] – T44ULC, T44UMC на 21.09.2024. Выбранная дата съёмки обусловлена наиболее удобным временем определения площади полога в связи с окончанием вегетационного периода у прилегающих к проектной площади ПЗЛП сельскохозяйственных культур [12]; 4) снимки сверхвысокого пространственного разрешения Google, полученные с сервиса Google Earth Pro [13]. Недостатком этого продукта является отсутствие выбора определённой даты съёмки, в большинстве случаев композит изображений состоит из разновременной мозаики снимков, что не даёт возможности для обобщённой классификации по «красному» каналу [14] лесного полога на всю территории исследования. В связи с этим, был подготовлен композит изображений по предлагаемым актуальным датам с сервиса Google Earth Pro – 05.04.2024, 24.05.2024, 01.06.2024, 06.06.2024, 11.06.2024, 17.07.2024, 18.09.2024, 01.10.2024. Классификация по

«красному» каналу проводилась для каждого снимка индивидуально.

В связи с тем, что лесомелиоративная теория [15, 16] определяет склоны крутизной более 2° как эрозионноопасные, то при выделении контуров обрабатываемых земель они классифицируются по крутизне склона менее и более 2°. Для построения карты крутизны склонов использована цифровая модель рельефа SRTM-1 с пространственным разрешением 30 м. На основании разработанной карты крутизны склона проводилась дифференциация обрабатываемых полей. При этом выделялись поля по классам: преимущественно дефляционно-опасные и преимущественно эрозионно-опасные, на которых предусматриваются применение полевых защитных и противоэрозионных лесных насаждений соответственно.

По рекомендациям, представленным в работах по защитному лесоразведению [17], для обеспечения защиты почв от дефляции рекомендуется размещать ПЗЛП перпендикулярно направлению преобладающих ветров в летний период. При этом расстояние между основными полосами для обыкновенных и южных чернозёмов составляет 500 и 400 м соответственно. На тёмно-каштановых и каштановых почвах это расстояние составляет 350 м, на светло-каштановых почвах – 250 м. Для расчёта преобладающих ветров использовался справочно-информационный портал «Погода и Климат», который предоставляет данные о посуточных направлениях ветра, количестве осадков и средних температур.

Оценка приуроченности сельскохозяйственных угодий к определённым типам почв проводилась по разработанной векторной почвенной карте (рис. 1), составленной на основе почвенной карты Алтайского края масштаба 1:2500000 [5].

В результате исследования установлено, что большая часть сельскохозяйственных угодий Михайловского района Алтайского края располагается на каштановых и тёмно-каштановых почвах (рис. 1).

Результаты и обсуждение

Данные ДЗЗ широко применяются для оценки состояния агролесоландшафтов, в том числе лесомелиоративной защищённости полей и сохранности ПЗЛП. Спутниковые снимки сверхвысокого пространственного разрешения используют для изучения агролесоландшафтов, при этом используют визуальный, полуавтоматический или автоматиче-

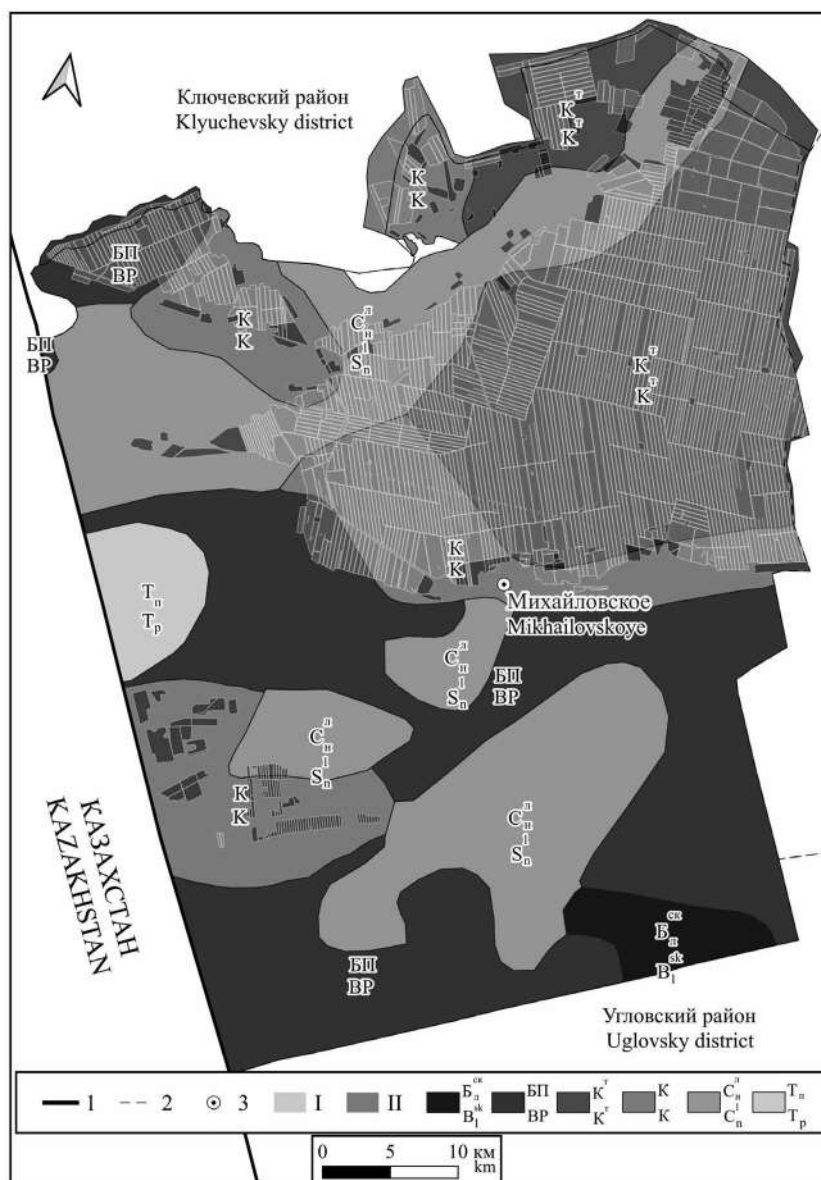


Рис. 1. Карта-схема расположения обрабатываемых земель, залежей и типов почв в Михайловском районе Алтайского края. 1 – государственная граница; 2 – граница района; 3 – населённые пункты; I – пашня; II – залежь; B^{sk} – лугово-болотные солончаковатые и солонцеватые почвы; BP – боровые пески; K^t – тёмно-каштановые почвы; K – каштановые почвы; Cⁿ – солонцы луговые (гидроморфные); Tⁿ – торфяные болотные переходные почвы

Fig. 1. Map of cultivated and fallow lands and soil types in the Mikhailovskiy district of the Altai Krai. 1 – state border; 2 – district border; 3 – settlements; I – cropland; II – fallow; B^{sk} – Endosalic Gleysols Sodic; BP – Rubic Arenosols Eutric; K^t – Haplic Kastanozems Chromic; K – Haplic Kastanozems Chromic; Sⁿ – Gleyic Solonetz Albic; T^p – Fibric Histosols Dystric

ский метод дешифрирования, в зависимости от объёма картографирования и масштаба изображения [18–20]. Такие исследования проводят для определения: сохранности лесных насаждений, плодородия почв, площади пожаров [21–23], проективного покрытия растительности [24, 25].

Изучение ПЛЗП с помощью данных ДЗЗ имеет свои особенности из-за необходимости использования снимков сверхвысокого разрешения, заключающиеся в применении

полуавтоматического метода выделения древостоя по значению энергетической яркости их отражения на снимке [14, 26].

В результате картографирования пахотных и залежных земель по снимкам сверхвысокого разрешения выделено контурами: 1342 объекта, из них 1129 относится к обрабатываемым полям, 213 – к залежам. Площадь обрабатываемых полей составила 93440,6 га. Площадь залежей составила 9633,3 га. Завышенные полученные результаты по площадям

залежных территорий обуславливаются наиболее поздним используемым источником (по данным спутника Landsat-5 на 1989 г.).

Проектная площадь ПЗЛП, полученная в ходе ручной векторизации, составила 6229 га. При сравнении информационных продуктов выделения лесного полога внутри контуров ПЗЛП получены следующие фактические площади лесных насаждений. Векторному слою проектной площади был присвоен атрибут с помощью инструмента «Зональная статистика» о количестве пикселей растровых данных продуктов GFC и ESRI, затем это количество умножено на площадь, равную пространственному разрешению каждого источника (15 и 10 м соответственно). Полученная площадь составила 47 и 0 га. Полученные результаты с помощью NDVI и классификации по «красному» каналу снимков с Google Earth Pro составили 3465,3 и 3478,6 га соответственно. В данных Лесного плана [27] не предоставляется информация о площадях ПЗЛП, только общая площадь лесных насаждений, расположенных на землях лесного фонда по муниципальным образованиям. По данной причине для определения точности картографирования методом кросс-валидации рассчитано значение попиксельного соответствия площадей, классифицированных с площадями выделенных ручным картографированием лесных насаждений на выборке в 111 выделов, что составляет 7,65 % от всех

ПЗЛП Михайловского района. Точность выделения лесного полога на снимке с помощью классификации по «красному» каналу и NDVI составила 86 и 68 % соответственно (рис. 2). В связи с этим, дальнейший анализ проводился по результатам, полученным с помощью классификации по «красному» каналу.

С использованием классификации по «красному» каналу разработана векторная карта фактической площади лесных насаждений по каждому муниципалитету территории исследования и установлена их сохранность (табл. 1) [28]. Большая часть лесных насаждений в районе имеет низкую и очень низкую сохранность с площадью в 2237,4 и 2106,7 га соответственно. Насаждения с высокой сохранностью полога в Михайловском районе имеют площади менее 10 % от общей площади. Наибольшая площадь насаждений с высокой и очень высокой сохранностью наблюдается в Полуямском сельсовете и составляет около 50 %. Наименьшая площадь насаждений с высокой и очень высокой сохранностью наблюдается в Михайловском сельсовете – менее 10 %.

В связи с отсутствием метеорологических станций в исследуемом районе, рассматривались усреднённые значения с портала «Погода и Климат» на административный центр района – село Михайловское. Среднемесячные направления преобладающих ветров на период вегетации (апрель–сентябрь) были рассчитаны на период с 2011 по 2023 гг. (рис. 3).

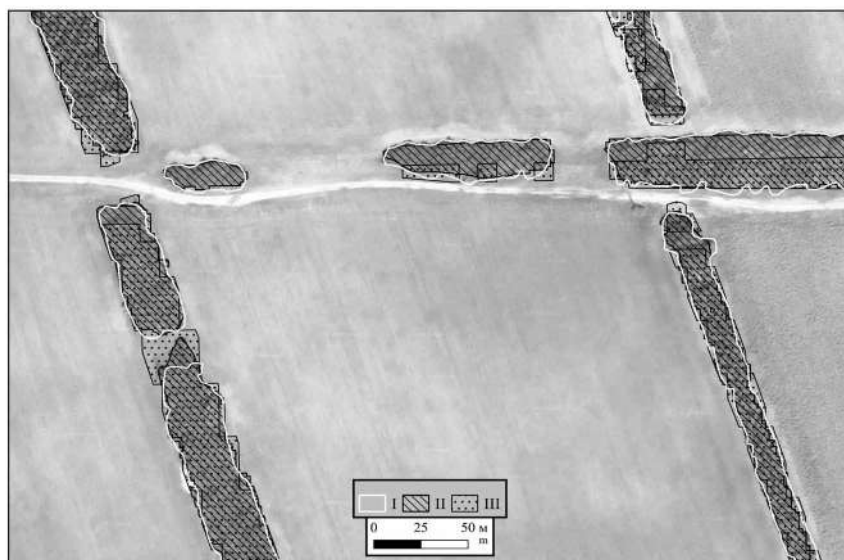


Рис. 2. Выделение лесного полога на тестовом участке на основе классификации по «красному» каналу и вегетационного индекса NDVI (I – контур ручной векторизации; II – классификация по «красному» каналу; III – классификация по вегетационному индексу NDVI)

Fig. 2. Allocation of the forest canopy in the test area based on the classification according to the “red” channel and the NDVI vegetation index (I – manual vectorization contour; II – classification according to the “red” channel; III – classification according to the NDVI vegetation index)

Таблица 1 / Table 1

Сохранность полегающих лесных полос в Михайловском районе Алтайского края, га
Forest shelter-belts preservation degree in the Mikhailovskiy district of the Altai Krai, ha

Сельсовет Village Council	Проектная площадь лесных полос с различной степенью сохранности / The design area of forest shelter-belts with different degree of preservation				Общее Total
	очень низкой very low (0–50 %)	низкой low (50–70 %)	высокой high (70–80 %)	очень высокой very high (80–100 %)	
Ащегульский Aschegulskiy	113,6	143,6	51,2	50,6	359
Бастанский Bastanskiy	178,5	163,8	135,7	77,1	555
Михайловский Mikhailovskiy	621,7	339,3	52	3,6	1016,6
Назаровский Nazarovskiy	189,0	144,9	43,8	16,5	394,2
Николаевский Nikolaevskiy	392,3	378,5	192,1	73,8	1036,8
Полуямский Poluyamskiy	243,6	256,4	275,8	213,9	989,7
Ракитовский / Rakitovskiy	367,9	810,9	481,7	118,2	1778,8
Всего / Total	2106,7	2237,4	1232,3	553,8	6130,1
*Прочее / Other	24,5	38,6	19,2	16,5	98,8

Примечание / Note: * – полегающие лесные полосы, прилегающие к угольям Михайловского района / forest shelter-belts adjacent to the Mikhailovskiy district lands.

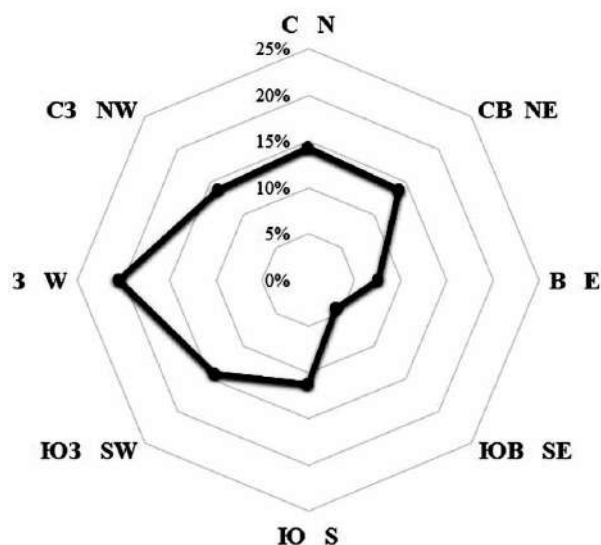


Рис. 3. Среднегодовые показатели преобладающих ветров в Михайловском районе
Fig. 3. Average annual indicators of prevailing winds in the Mikhailovskiy district

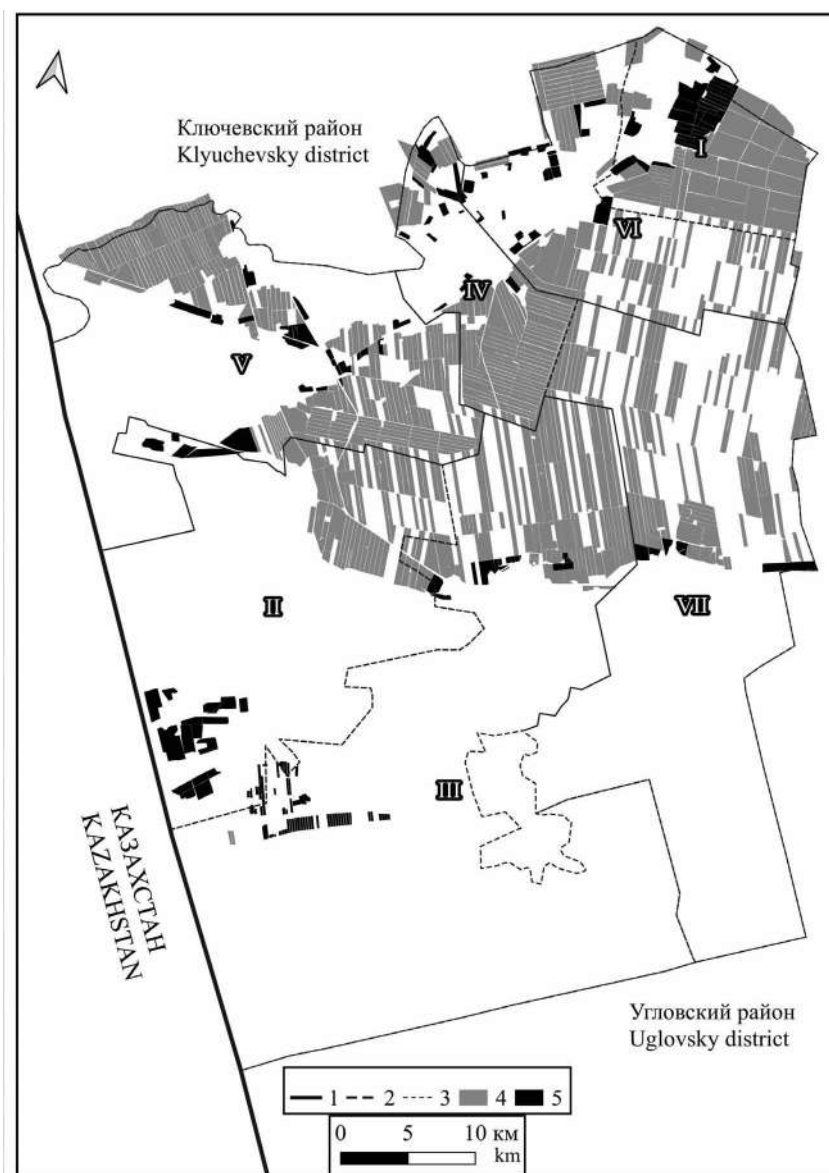


Рис. 4. Пространственное распределение незащищённых от преобладающих ветров сельскохозяйственных угодий Михайловского района Алтайского края.

1 – государственная граница, 2 – граница района, 3 – граница муниципалитетов, 4 – незащищённые пахотные земли, 5 – незащищённые залежные земли, I–VII – сельсоветы

Fig. 4. Spatial distribution of agricultural lands unprotected from prevailing winds in the Mikhailovskiy district of the Altai Krai. 1 – state border, 2 – district border, 3 – municipal border, 4 – unprotected arable lands, 5 – unprotected fallow lands, I–VII – village councils

Таблица 2 / Table 2

Распределение площади сельскохозяйственных угодий, незащищённых лесомелиоративными системами / The area of arable lands unprotected by forest reclamation systems

Сельсовет Village council	Площадь угодий, незащищённых по направлению ветра, % The area of arable lands unprotected in the wind direction, %								Всего, га Total, ha
	C N	CB NE	B E	ЮВ SE	Ю S	ЮЗ SW	З W	СЗ NW	
I	99,8	100,0	92,5	100,0	99,3	100,0	93,9	100,0	8915,9
II	100,0	76,5	67,4	100,0	100,0	89,7	71,2	100,0	7895,6
III	100,0	66,5	66,5	100,0	100,0	71,8	68,5	100,0	14297,1
IV	80,6	99,7	96,3	100,0	86,0	93,9	97,5	100,0	7438,6
V	90,4	73,1	82,2	100,0	90,5	77,5	86,2	100,0	15973,6
VI	96,3	96,6	46,3	96,6	96,1	96,7	54,8	95,7	14585,0
VII	99,5	86,1	39,2	100,0	98,8	79,4	39,9	100,0	24334,7
Сельсовет Village council	Количество угодий, незащищённых по направлению ветра The number of arable lands unprotected in the wind direction								Всего, шт. Total, pcs.
	C N	CB NE	B E	ЮВ SE	Ю S	ЮЗ SW	З W	СЗ NW	
I	89	90	54	90	87	90	61	90	90
II	102	71	57	102	102	86	61	102	102
III	135	83	79	138	138	90	84	138	138
IV	94	115	102	118	100	106	107	118	118
V	284	211	231	315	284	219	250	315	315
VI	254	254	89	254	253	255	120	253	256
VII	309	260	104	313	308	240	109	313	313

Примечание: здесь и на рис. 4: I – Ащегульский, II – Бастанский, III – Михайловский, IV – Назаровский, V – Николаевский, VI – Полуйамский, VII – Ракитовский.

Note: here and in Fig. 4: I – Aschegulskiy, II – Bastanskiy, III – Mikhailovskiy, IV – Nazarovskiy, V – Nikolaevskiy, VI – Poluyamskiy, VII – Rakitovskiy.

С целью оценки защищённости сельскохозяйственных угодий на территории исследования каждой полосе был присвоен атрибут с азимутами (с юга на север) для расчёта эффективности ПЗЛП и защиты сельскохозяйственных угодий от разных направлений ветров. Через инструмент «Буферизация» в ГИС был создан векторный слой в 350 м фактических площадей ПЗЛП, защищающих угодья. Против преобладающих ветров с западного направления, по рекомендациям защитного лесоразведения, рассматривались ПЗЛП с азимутами от 330 до 30°, против ветров с северо-западного направления – от 15 до 75° и т. д. Общая площадь полей, незащищённых от преобладающих ветров с западного направления, на территории Михайловского района Алтайского края составила 69,6 % (табл. 2).

В результате исследования составлена карта-схема сельскохозяйственных угодий Михайловского района Алтайского края, незащищённых от преобладающих ветров (рис. 4). Полученная схема может быть использована при составлении предложений по восстановлению отсутствующих лесных насаждений, необходимых для защиты угодий.

Заключение

По результатам исследования разработаны на основе данных ДЗЗ геоинформационные картографические слои пространственного размещения сельскохозяйственных угодий и полевых защитных лесных полос. Установлено фактическое соответствие конструкции размещения ПЗЛП в агролесоландшафтах лесомелиоративным нормам, что определяет лесомелиоративную защищённость сельскохозяйственных угодий. Разработаны картографические векторные слои используемых земель и залежей, которые коррелируют со статистическими данными по региону исследований.

Выполнено определение точности выявления фактических площадей лесных насаждений с использованием 4 продуктов – ESRI, GFC, NDVI и методом классификации по «красному» каналу по сравнению с ручной векторизацией. Установлено, что более точным из них является определение методом компьютерной классификации по «красному» каналу (86 %) на тестовом участке площадью, составляющей 7,65 % от общей проектной пло-

щади ПЗЛП (6130,1 га). Выявлено, что более 70 % от всей проектной площади насаждений имеют низкую и очень низкую сохранность, что соответствует практическому распаду насаждений и не выполнению ими своих по-лезащитных функций. Полезащитные лесные полосы с очень высокой сохранностью на территории исследования занимают площадь 553,8 га. Площадь обрабатываемых полей, не-защищённых лесомелиоративными системами от преобладающих ветров, на территории ис-следования составляет 69,6 %. Такая высокая доля незащищённых земель может привести к значительным потерям плодородного слоя почвы и к снижению продуктивности сель-скохозяйственных угодий.

Полученные результаты могут быть ис-пользованы при проектировании размеще-ния агролесомелиоративных комплексов для защиты сельскохозяйственных земель от деградации.

Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН № FNFE-2024-0008 «Ма-тематическое моделирование и прогнозирование процессов дефляции земель сельскохозяйствен-ного назначения при техногенных и природных воздействиях на современном уровне лесомелио-ративной защищённости».

Литература

1. Манаенков А.С., Абакумова А.С., Подгаецкая П.М. Повышение долговечности полезащитных лесных полос на юге Западной Сибири // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее про-фессиональное образование. 2014. № 2 (34). С. 41–47.
2. Федеральная служба государственной статистики по Алтайскому краю и Республике Алтай [Электронный ресурс] <https://22.rosstat.gov.ru/statistic> (Дата обраще-ния: 20.11.2024).
3. Калюта Е.В., Мальцев М.И., Базарнова Н.Г. Анализ пестицидной нагрузки при возделывании зерновых культур в Алтайском крае // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 175–181. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-175-181
4. Беховых Ю.В. Продуктивные запасы влаги в почвах горельников юго-западной части ленточных боров Алтайского края в условиях сухостепной зоны // Вестник Алтайского государственного аграрного уни-верситета. 2011. № 11 (85). С. 48–52.
5. Почвенная карта РСФСР. Масштаб 1:2 500 000 / Отв. ред. В.М. Фридланд. М.: Главное управление гео-дезии и картографии при Совете Министров СССР, 1988.
6. Синельникова К.П. Анализ современного состоя-ния защитных лесных насаждений в зоне каштановых почв Донской гряды // Степи Северной Евразии: мате-риалы X международного симпозиума. Оренбург: ИС УрО РАН, 2024. С. 1243–1245. doi: 10.24412/cl-37200-2024-1243-1245.
7. Барышникова О.Н., Ольферт А.П., Репко А.Г., Фатуева Ю.И. Проблемы создания экологического каркаса агроландшафтов на территории Алтайского края // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2019. Т. 29. № 3. С. 353–361. doi: 10.35634/2412-9518-2019-29-3-353-361
8. Лебедева Л.В., Лучникова Н.М. Рациональное использование и охрана земель сельскохозяйственного назначения (на примере Михайловского района Алтай-ского края) // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2021. № 7 (201). С. 46–51.
9. Huan V.D. Accuracy assessment of land use land cover LULC 2020 (ESRI) data in Con Dao island, Ba Ria – Vung Tau province, Vietnam // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1028. No. 1. Article No. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/1028/1/012010
10. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Han-cher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Steh- man S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. V. 342. P. 850–853. doi: 10.1126/ science.1244693
11. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage experience and capabilities of the VEGA-science system // Remote Sens. 2022. V. 14. No. 1. Article No. 77. doi: 10.3390/rs14010077
12. Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. Оценка лесистости агроландшафтов юга Приволжской возвышенности по данным NDVI // Известия Ниж-неволжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее образование. 2016. № 4 (44). С. 24–32.
13. Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y., Gong P. Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine // Remote Sens. 2021. V. 13. No. 18. Article No. 3778. doi: 10.3390/rs13183778
14. Юферев В.Г., Кулик К.Н., Рулев А.С., Коше-лев А.В. Способ определения состояния защитных лесных насаждений // Патент RU 2330242 С1. Заяв-ление: 2006144553/28, 13.12.2006. Дата публикации: 27.07.2008. Бюлл. 21.
15. Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В. Гео-информационное картографирование и моделирование эрозийных ландшафтов. Волгоград: Всероссийский научно-исследовательский агролесомелиоративный институт, 2015. 153 с.
16. Рулев А.С., Юферев В.Г. Математико-геоморфо-логическое моделирование эрозийных ландшафтов // Геоморфология. 2016. № 3. С. 36–45. doi: 10.15356/0435-4281-2016-3-36-45
17. Агролесомелиорация: монография / Ред. А.Л. Ива-нов, К.Н. Кулик. Волгоград: ВНИАЛМИ, 2006. 746 с.

18. Нарожная А.Г., Чендев Ю.Г. Изучение современного экологического состояния лесных полос с использованием ГИС и ДДЗ // ИнтерКарто. Интер-ГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы междунар. конф. М.: Изд-во Московского ун-та, 2020. Т. 26. Ч. 2. С. 54–65. doi: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65

19. Koshelev A.V., Tkachenko N.A., Shatrovskaya M.O. Decoding of forest belts using satellite images // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. V. 875. Article No. 012065. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012065

20. Vassilev K.V., Assenov A.I., Velez N.I., Grigorov B.G., Borissova B.B. Distribution, characteristics and ecological role of protective forest belts in Silistra municipality, Northeastern Bulgaria // Ecologia Balcanica. 2019. V. 11. No. 1. P. 191–204.

21. Лупян Е.А., Барталев С.А., Балашов И.В., Егоров В.А., Ершов Д.В., Кобец Д.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Сычугов И.Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175

22. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотноков Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

23. Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 157–168. doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168

24. Барталев С.А., Богодухов М.А., Жарко В.О., Сидоренков В.М. Исследование возможностей использования данных ICESat-2 для оценки высоты лесов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 195–206. doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206

25. Ховратович Т.С., Барталев С.А., Кашницкий А.В. Метод детектирования изменений лесов на основе попиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 102–110. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110

26. Рулев А.С., Юферев В.Г., Юферев М.В. Картографо-аэрокосмический мониторинг аридных агроландшафтов // Вестник Института комплексных исследований аридных территорий. 2011. № 1 (22). С. 57–63.

27. Лесной план Алтайского края на 2019–2028 гг., утверждён постановлением губернатора Алтайского края №33 от 26.02.2019 г. Министерство природных ресурсов и экологии Алтайского края [Электронный ресурс] https://minprirody.alregn.ru/dokument/lesnoj_plan_

[altajskogo_kraja_/lesnoj_plan_2019-2028_gg./](https://minprirody.alregn.ru/dokument/lesnoj_plan_) (Дата обращения: 17.11.2024).

28. Рулев А.С., Юферев В.Г., Михалев В.Ю., Маенко А.Н. Способ определения сохранности лесных насаждений // Патент RU 2437061 С1. Заявление: 2010115216/28, 19.04.2010. Дата публикации: 20.12.2011. Бюлл. 35.

References

1. Manaenkov A.S., Abakumova A.S., Podgaetskaya P.M. Increasing the durability of protective forest belts in the south of Western Siberia // Proceedings of lower Volga agro-university complex: Science and higher education. 2014. No. 2 (34). P. 41–47 (in Russian).

2. Federal State Statistics Service for the Altai Krai and the Altai Republic [Internet resource] <https://22.rosstat.gov.ru/statistic> (Accessed: 20.11.2024) (in Russian).

3. Kalyuta E.V., Maltsev M.I., Bazarnova N.G. Analysis of the pesticide load in the Altai Region's cereal cropping // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 175–181 (in Russian) doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-175-181

4. Behovykh Yu.V. Productive moisture reserves in the soils of mountain forests of the southwestern part of the ribbon forests of the Altai Territory in the conditions of the dry-steppe zone // Bulletin of Altai State Agricultural University. 2011. No. 11 (85). P. 48–52 (in Russian).

5. Soil map of the RSFSR. Scale 1:2,500,000 / Ed. V.M. Friedland. Moskva: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1988 (in Russian).

6. Sinelnikova K.P. Analysis of the current state of protective forest plantations in the zone of chestnut soils of the Don ridge // Steppes of Northern Eurasia: materialy X mezhdunarodnogo simpoziuma. Orenburg: IS UrO RAN, 2024. P. 1243–1245 (in Russian) doi: 10.24412/cl-37200-2024-1243-1245

7. Baryshnikova O.N., Olfert A.P., Repko A.G., Fatueva Yu.I. Problems of creating an ecological framework of agro-landscapes in the territory of Altai Krai // Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences. 2019. V. 29. No. 3. P. 353–361 (in Russian) doi: 10.35634/2412-9518-2019-29-3-353-361

8. Lebedeva L.V., Luchnikova N.M. Rational use and protection of agricultural lands (case study of the Mikhailovskiy district of the Altai Region) // Bulletin of Altai State Agricultural University. 2021. No. 7 (201). P. 46–51 (in Russian).

9. Huan V.D. Accuracy assessment of land use land cover LULC 2020 (ESRI) data in Con Dao island, Ba Ria – Vung Tau province, Vietnam // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2022. V. 1028. No. 1. Article No. 012010. doi: 10.1088/1755-1315/1028/1/012010

10. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Han-cher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Steh-

man S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. V. 342. P. 850–853. doi: 10.1126/science.1244693

11. Loupian E., Bourtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage experience and capabilities of the VEGA-science system // *Remote Sens*. 2022. V. 14. No. 1. No. 77. doi: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-9-31

12. Rulev A.S., Kosheleva O.Yu., Shinkarenko S.S. Assessing of woodiness in agrolandscapes of the Southern Volga Upland according to NDVI // *Proceedings of lower Volga agro-university complex: Science and higher education*. 2016. No. 4 (44). P. 24–32 (in Russian).

13. Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y., Gong P. Progress and trends in the application of Google Earth and Google Earth Engine // *Remote Sens*. 2021. V. 13. No. 18. Article No. 3778. doi: 10.3390/rs13183778

14. Juferev V.G., Kulik K.N., Rulev A.S., Koshelev A.V. Method of protective forest range condition monitoring // Patent RU 2330242 C1. Application: 2006144553/28, 12/13/2006. Date of publication: 27.07.2008. Bull. 21 (in Russian).

15. Rulev A.S., Yuferev V.G., Yuferev M.V. Geoinformation mapping and modeling of erosive landscapes. Volgograd: All-Russian Scientific Research Agroforestry Institute, 2015. 153 p. (in Russian).

16. Rulev A.S., Yuferev V.G. Mathematical and geomorphological modeling of erosion landscapes // *Geomorfologia*. 2016. No. 3. P. 36–45 (in Russian). doi: 10.15356/0435-4281-2016-3-36-45

17. Agroforestry: monograph / Eds. A.L. Ivanov, K.N. Kulik. Volgograd: VNIALMI, 2006. 746 p (in Russian).

18. Narozhnyaya A.G., Chendev Yu.G. The study of the modern ecological state of shelterbelts using GIS and Remote Sensing Data // *InterCarto. InterGIS. Geoinformatsionnoe obespechenie ustoychivogo razvitiya territoriy: materialy mezhdunarodnoy konferentsii*. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta. 2020. V. 26. Pt. 2. P. 54–65 (in Russian). doi: 10.35595/2414-9179-2020-2-26-54-65

19. Koshelev A.V., Tkachenko N.A., Shatrovskaya M.O. Decoding of forest belts using satellite images // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 875. Article No. 012065. doi: 10.1088/1755-1315/875/1/012065

20. Vassilev K.V., Assenov A. I., Velev N. I., Grigorov B.G., Borissova B.B. Distribution, characteristics and ecological role of protective forest belts in Silistra municipi-

ality, northeastern Bulgaria // *Ecologia Balcanica*. 2019. V. 11. No. 1. P. 191–204.

21. Loupian E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Senko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G. Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection) // *Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2017. V. 14. No. 6. P. 158–175 (in Russian) doi: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175

22. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Land cover mapping over Russia using Earth observation data. Moskva: Russian Academy of Sciences' Space Research Institute, 2016. 208 p. (in Russian).

23. Zharko V.O., Bartalev S.A., Egorov V.A. Investigation of forest growing stock volume estimation possibilities over Russian Primorsky Krai region using Proba-V satellite data // *Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2018. V. 15. No. 1. P. 157–168 (in Russian) doi: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-157-168

24. Bartalev S.A., Bogodukhov M.A., Zharko V.O., Sidorenkov V.M. Investigation of the ICESat-2 data capabilities for forest height estimation over Russia // *Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2022. V. 19. No. 4. P. 195–206 (in Russian) doi: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-195-206

25. Khovratovich T.S., Bartalev S.A., Kashnitskii A.V. Forest change detection based on sub-pixel estimation of crown cover density using bitemporal satellite data // *Current problems of remote sensing of the Earth from space*. 2019. V. 16. No. 4. P. 102–110 (in Russian) doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-102-110

26. Rulev A.S., Yuferev V.G., Yuferev M.V. The mapping-aerospace monitoring of the arid agrolandscapes // *Vestnik Instituta kompleksnykh issledovaniy aridnykh territoriy*. 2011. No. 1 (22). P. 57–63 (in Russian).

27. The forest plan of the Altai Krai for 2019–2028, approved by the decree of the Governor of the Altai Krai No. 33 dated 26.02.2019. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Altai Krai [Internet resource] https://minprirody.alregn.ru/dokument/lesnoj_plan_altajskogo_kraja/lesnoj_plan_2019-2028_gg/ (Accessed: 17.11.2024) (in Russian).

28. Rulev A.S., Juferev V.G., Mikhalev V.Ju., Mayenko A.N. Method for determining safety of forest ranges // Patent RU 2437061 C1. Application: 2010115216/28, 04/19/2010. Date of publication: 20.12.2011. Bull. 35 (in Russian).

Токсичность меди для *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894 в условиях повышенной минерализации и содержания органического вещества

© 2026. А. М. Шеромов¹, аспирант,
Р. А. Ложкина², к. б. н., с. н. с.,
А. С. Олькова¹, д. б. н., профессор,

¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина

Российской академии наук,

152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109,

e-mail: usr08617@vyatsu.ru, lozhkina.roza@yandex.ru

Различная степень токсичности природных и техногенных сред, имеющих одинаковый уровень загрязнения потенциально опасными веществами, например, тяжёлыми металлами, вследствие действия дополнительных факторов, остаётся одной из центральных проблем экологической токсикологии. Целью данной работы была оценка влияния колебаний минерализации и содержания органического вещества в водной среде на токсичность меди для ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894. Проводили биотестирование воды, в которую вносили $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0,005; 0,01; 0,025 мг/л в расчёте на Cu^{2+}). Влияние минерализации и органического вещества на эффекты Cu^{2+} оценивали путём внесения в аналогичные растворы NaCl (0,5; 1,0; 2,0 г/л) и гумата калия (0,5; 1,0; 2,5 %) с дальнейшим сравнением результатов анализа. Влияние минерализации на токсичность Cu^{2+} было двойственным. Умеренное увеличение её уровня (добавление 0,5 г/л NaCl) значимо снижало токсичность Cu^{2+} , что проявлялось в снижении смертности рачков при концентрациях 0,005 и 0,025 мг/л ($p < 0,05$). Однако высокий уровень минерализации (2,0 г/л NaCl) на фоне максимальной концентрации Cu^{2+} (0,025 мг/л) вызывал 100 % гибель тест-организмов. Плодовитость *C. dubia* при росте минерализации закономерно снижалась. Добавление органического вещества (в виде гумата калия) в условиях негативного действия Cu^{2+} приводило к снижению смертности и повышению репродуктивной функции *C. dubia*. Наиболее выраженный эффект наблюдался при максимальной концентрации Cu^{2+} (0,025 мг/л). Так плодовитость рачков в вариантах с добавками 0,5; 1 и 2,5 % гумата калия была выше контроля в 6,9; 6,7 и 3,2 раза соответственно. Следовательно, совместное действие тяжёлых металлов и сопутствующих абиотических факторов, таких как уровень минерализации и содержание органического вещества, в значительной степени определяется их соотношением в среде.

Ключевые слова: медь, хлорид натрия, гумат калия, минерализация, органическое вещество, совместное действие веществ, биотестирование, водная среда, *Ceriodaphnia dubia*.

Copper toxicity to *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894 under increased mineralization and high organic matter content

© 2026. A. M. Sheromov¹ ORCID: 0009-0005-8691-4042^{*}

R. A. Lozhkina² ORCID: 0000-0003-3087-0691^{*}

A. S. Olkova¹ ORCID: 0000-0002-5798-8211^{*}

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences

109, Borok, Nekouz Region, Yaroslavl Oblast, Russia, 152742,

e-mail: usr08617@vyatsu.ru, lozhkina.roza@yandex.ru

The variability in toxicity of the same hazardous substance across different environments due to the influence of additional factors is a key challenge in bioassay. This study aimed to evaluate the effect of water mineralization and organic matter content on copper toxicity to the cladoceran *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894. Test organisms were

exposed to waters amended with $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.005, 0.01 and 0.025 mg/L Cu^{2+}). Sodium chloride (0.5, 1.0 and 2.0 g/L) and potassium humate (0.5, 1.0 and 2.5 %) were added to the above solutions to assess the effect of mineralization and organic matter. The effect of mineralization on copper toxicity was twofold. A moderate increase in mineralization (0.5 g/L NaCl) significantly reduced copper toxicity, as evidenced by decreased *C. dubia* mortality at 0.005 and 0.025 mg/L Cu^{2+} ($p < 0.05$). Conversely, high mineralization (2.0 g/L NaCl) combined with a high copper content (0.025 mg/L) resulted in 100 % mortality. Furthermore, *C. dubia* fertility showed a consistent negative correlation with increasing mineralization. Organic matter addition reduces mortality and enhances reproductive output in *C. dubia*. This effect was most pronounced at the highest Cu^{2+} concentration (0.025 mg/L). Specifically, *Ceriodaphnia* brood size in treatments supplemented with 0.5 %, 1 % and 2.5 % potassium humate was 6.9, 6.7 and 3.2 times higher than in the corresponding control, respectively.

Keywords: copper, sodium chloride, potassium humate, mineralization, organic matter, combined effect of substances, bioassay, aquatic environment, *Ceriodaphnia dubia*.

Результаты биотестирования компонентов окружающей среды в значительной степени зависят не только от концентрации загрязняющих веществ (ЗВ), но и комплекса других экологических факторов [1]. Это является практической и научной проблемой при интерпретации данных экологического мониторинга и последующего принятия обоснованных природоохранных решений. При этом одним из ключевых интегральных показателей качества воды является общая минерализация, которая представляет собой суммарное содержание всех растворённых в воде минеральных и органических веществ.

Попадая в воду, ЗВ оказывают влияние на живые организмы, встраиваясь в систему веществ естественного и антропогенного происхождения, уже присутствующих в среде [2]. Эффекты отдельно взятого вещества будут отличаться от действия его в смеси с другими соединениями, что снижает точность прогнозов лабораторного экотоксикологического моделирования. Так, гуминовые кислоты в природных и экспериментальных средах могут влиять на потенциальную токсичность тяжёлых металлов (ТМ), усиливая или ослабляя их действие в зависимости от видоспецифических особенностей тест-организмов [3]. Колебания уровня электропроводности, чаще всего обусловленные составом и соотношением солей в водных средах, также способны изменять токсичность ТМ [4]. Первым шагом в решении данной проблемы является моделирование совместного действия веществ, которые часто присутствуют в водных экосистемах одновременно.

Наиболее распространёнными сочетаниями являются загрязнение воды ТМ на фоне различных концентраций органического вещества (ОВ) и значений общей минерализации. Колебания этих факторов характерны для водных объектов по всему миру [5]. В России эта проблема также актуальна, особенно для малых рек. Малые реки круглогодично

обогащены гуминовыми веществами, так как получают питание от болотных систем. В период весеннего половодья эта особенность характерна и для большинства средних рек не заболоченных территорий [6].

Уровень естественной минерализации также значительно варьирует в пространстве и по сезонам года. Так, в бассейне р. Камы, существенным фактором повышения минерализации служит интенсивное засоление грунтовых и поверхностных вод вследствие разработки месторождения калийно-магниевых солей [7]. Проблема засоления поверхностных вод в целом характерна для промышленно развитых и урбанизированных территорий [8]. При этом, критерии оценки и нормативы для всех природных водных объектов остаются едиными.

Целью данной работы была оценка влияния колебаний минерализации и содержания органического вещества в водной среде на токсичность меди для ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894.

Объекты и методы исследования

Моделировали индивидуальное действие Cu^{2+} (0,005; 0,01; 0,025 мг/л), а также их совместное воздействие с гуматом калия (ГК) (0,5; 1,0; 2,5 %) и NaCl (0,5; 1,0; 2,0 г/л) на ветвистоусого рачка *C. dubia*. Для этого на отстоянной водопроводной воде питьевого качества (контроль) готовили маточные растворы с добавлением $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (1 мг/л в пересчёте на Cu^{2+}), ГК (50 %) и NaCl (90 г/л). Использовали соли $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и NaCl категории «химически чистые» с массовой долей основного вещества > 99 % (согласно паспортам реактивов), а также раствор ГК с содержанием сухого вещества 5,0–5,3 % без добавок микроэлементов (ООО «БИО-комплекс», Россия). Приготовление тестируемых растворов проводили методом разбавлений (табл.).

Варианты модельного эксперимента / Experimental design

ХПК, мг O ₂ /л / COD, mg O ₂ /L			
Содержание ГК, % KH content, %	Концентрация Cu ²⁺ , мг/л / Cu ²⁺ content, mg/L		
	0,005	0,01	0,025
0,5	22 ± 7	29 ± 9	29 ± 9
1	39 ± 12	42 ± 13	37 ± 11
2,5	112 ± 22	110 ± 22	103 ± 21
Минерализация, г/л / TDS, g/L			
Концентрация NaCl, г/л NaCl content, g/L	Концентрация Cu ²⁺ , мг/л / Cu ²⁺ content, mg/L		
	0,005	0,01	0,025
0,5	0,73 ± 0,07	0,75 ± 0,07	0,73 ± 0,07
1	1,13 ± 0,10	1,18 ± 0,11	1,23 ± 0,11
2	2,11 ± 0,19	2,11 ± 0,19	2,13 ± 0,19

Примечание: ГК – гумат калия; ХПК – химическое потребление кислорода. Погрешности определения ХПК (ПНД Ф 14.1:2:4.190-03) и измерения минерализации (ПНД Ф 14.1:2:4.261-10) рассчитаны согласно используемым методикам.

Note: KH – potassium humate; COD – chemical oxygen demand; TDS – total dissolved solids. COD uncertainty and TDS measurement error were calculated according to standard methodologies.

Контрольную воду для биотестирования отбирали в объёме, достаточном для проведения всего эксперимента, включая регулярную замену растворов. В дальнейшем её хранили в пластиковых инертных ёмкостях при температуре 10 ± 1 °C. Химические характеристики воды указывали на её питьевое качество. В тестируемых растворах на момент постановки эксперимента дополнительно оценивали общую минерализацию и уровень химического потребления кислорода (табл.). В контроле минерализация составила 0,24 г/л, показатель ХПК – 38 ± 8 мг O₂/л, содержание общей меди – ниже предела обнаружения.

Биотестирование проводили на синхронизированной по возрасту молодёжи лабораторной культуры планктонных ветвистых ракообразных *C. dubia* в соответствии с общепринятыми методиками [9]. Работы выполняли на базе лаборатории физиологии и токсикологии водных животных Института биологии внутренних вод РАН. В ходе хронического эксперимента животных кормили раз в два дня зелёными водорослями *Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890 в концентрации 250–300 тыс. кл./мл в момент смены среды (ФР.1.39.2007.03221). Эксперименты проводили в двух повторностях по 10 стаканов в каждой. Поддерживали оптимальные условия среды: температура воды – 22 ± 2 °C, pH – 7,0–8,0, растворённый кислород на уровне насыщения, фотопериод – свет:темнота (16:8). Критерий острой токсичности – гибель 50 % и более рачков за 48 ч в исследуемой среде при условии, что их гибель в контроле не превышает 10 %; хронической – гибель 20 % и

более тест-организмов и значимое отклонение в плодовитости по сравнению с контролем за время эксперимента. Увеличение плодовитости рачков более чем на 30 % рассматривалось как проявление хронического токсического действия [10]. В контроле на момент завершения опыта гибель рачков составила 10 %, а средняя плодовитость – $18,2 \pm 3,0$ экз./самку, что соответствует критериям приемлемости теста.

Результаты обрабатывали статистически, данные представляли в виде средних значений и их стандартных ошибок ($\bar{x} \pm SE$). Для оценки различий между показателями использовали критерий Краскела–Уоллиса (Kruskal–Wallis *H*-test, непараметрический дисперсионный анализ). Для выявления взаимосвязей, а также оценки их силы и направленности, использовали корреляционный анализ (ранговый критерий Спирмена, r_s). Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Влияние меди на показатели смертности и плодовитости *C. dubia*. При индивидуальном действии меди на ветвистоусого рачка *C. dubia* наблюдался дозозависимый эффект по всем оцениваемым показателям (рис. 1, см. цв. вкладку VI). Смертность цериодафний возрастала по мере увеличения концентрации Cu²⁺ в водном растворе и составила 45, 70 и 70 % при концентрациях 0,005; 0,01 и 0,025 мг/л соответственно.

Полученные данные согласуются с результатами других исследований. Например, острая токсичность (48-часовая LC₅₀) Cu²⁺ для

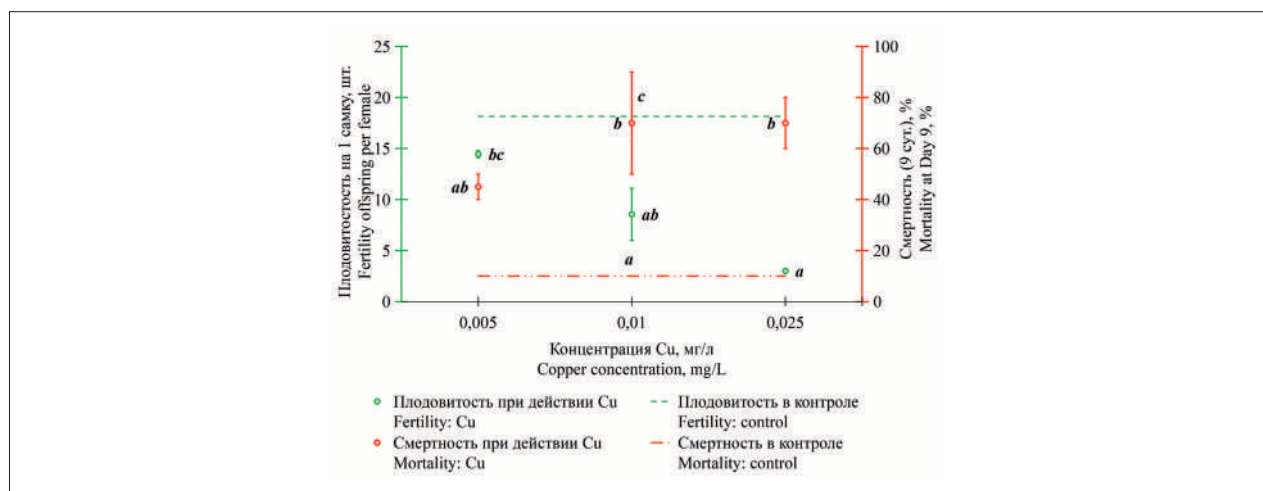


Рис. 1. Влияние меди на показатели плодовитости и смертности *C. dubia*
 Fig. 1. Copper effects on fertility and mortality of *C. dubia*

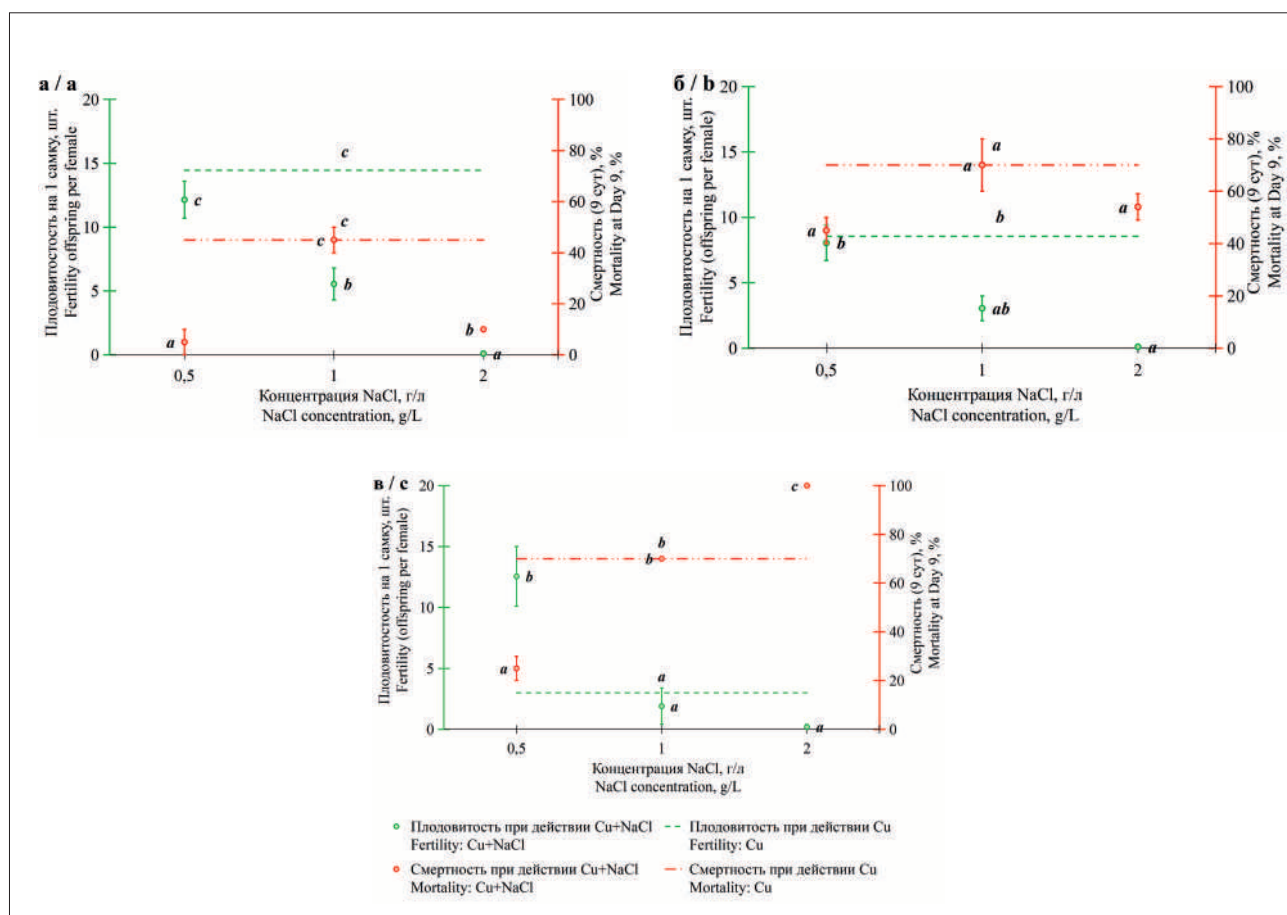


Рис. 2. Плодовитость и смертность *C. dubia* в водных растворах с возрастающими концентрациями Cu^{2+} (а – 0,005, б – 0,01, в – 0,025 мг/л) на фоне увеличивающейся концентрации NaCl
 Fig. 2. Dose-dependent effects of Cu^{2+} (a – 0.005, b – 0.01, c – 0.025 mg/L) on *C. dubia* fertility and mortality across a gradient of NaCl concentrations

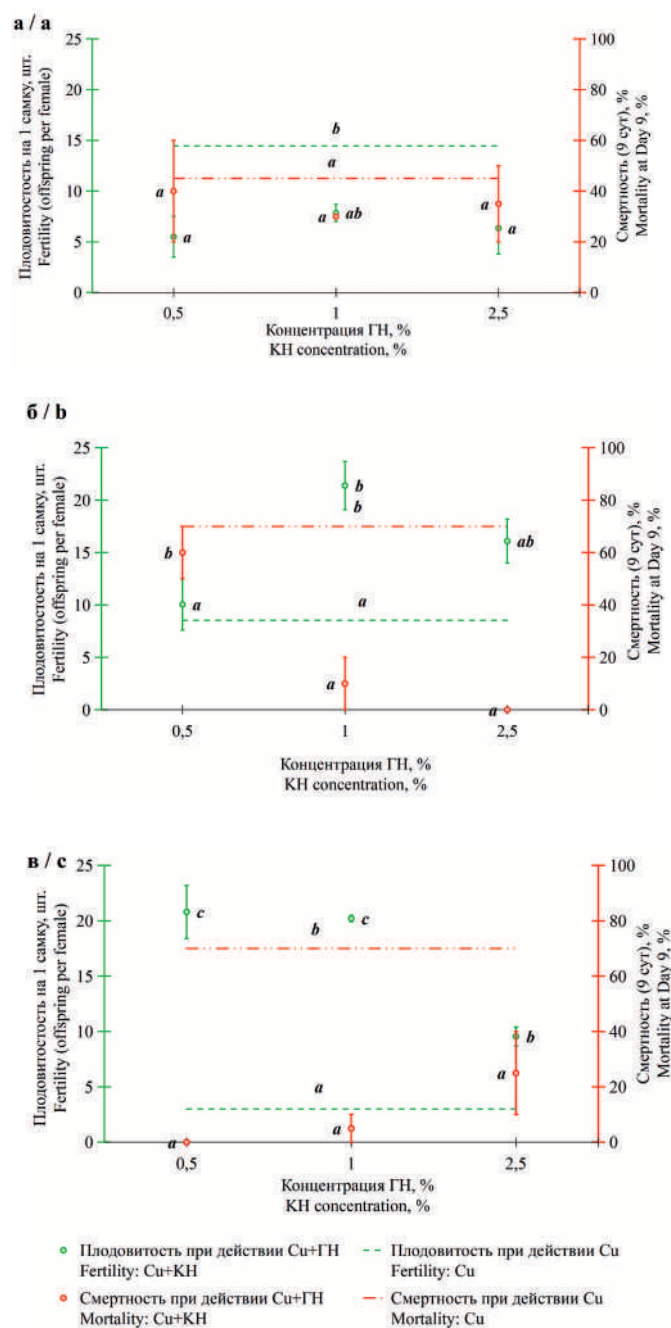


Рис. 3. Плодовитость и смертность *C. dubia* в водных растворах с возрастающими концентрациями Cu^{2+} (а – 0,005 мг/л, б – 0,01 мг/л, в – 0,025 мг/л) на фоне увеличивающейся концентрации гумата калия

Fig. 3. Dose-dependent effects of Cu^{2+} (a – 0.005, b – 0.01, c – 0.025 mg/L) on *C. dubia* fertility and mortality across a gradient of potassium humate content

C. dubia составляет около 0,0106 мг/л, а порог хронического воздействия может начинаться уже с 0,0026 мг/л [11]. Репродуктивные показатели рачков в вариантах с повышенными концентрациями Cu^{2+} 0,01 и 0,025 мг/л были в 1,7 и 4,8 раз ниже по сравнению с наименьшей из тестируемых концентраций Cu^{2+} (0,005 мг/л). Эффект снижения плодовитости *C. dubia* при возрастании содержания Cu^{2+} закономерен и связан с комплексом физиологических и биохимических нарушений [12].

Влияние уровня минерализации на токсичность меди. В вариантах смесей, содержащих минимальную концентрацию Cu^{2+} добавление как низкой (0,5 г/л), так и высокой (2 г/л) дозы NaCl отмечено значимое снижение смертности цериодафний по сравнению с индивидуальным действием меди (рис. 2а, см. цв. вкладку VI). Однако при промежуточной концентрации NaCl (1 г/л) различия в смертности были статистически не значимы. При увеличении концентрации Cu^{2+} до 0,01 мг/л тенденция сохранилась, но разница в значениях смертности между вариантами была недостоверной (рис. 2б, см. цв. вкладку VI).

Действие максимальной концентрации Cu^{2+} (0,025 мг/л) в комбинации с низкими и средними дозами NaCl (0,5 и 1,0 г/л) было аналогично эффектам, наблюдавшимся в других сериях (рис. 2в, см. цв. вкладку VI). Наименьшая добавка NaCl (0,5 г/л) снижала токсичность меди, тогда как при внесении 1,0 г/л NaCl смертность рачков возвращалась к уровню, характерному для индивидуального действия Cu^{2+} . Закономерность нарушалась при высокой минерализации (2,0 г/л NaCl) в сочетании с 0,025 мг/л Cu^{2+} : данная комбинация вызывала синергический эффект, приводя к 100 % гибели всех тест-организмов.

Следовательно, влияние минерализации на токсичность ионов меди (II) носит разнонаправленный характер. Умеренное повышение минерализации (0,5 г/л NaCl) оказывало защитный эффект, снижая токсичность меди на смертность тест-организмов. Данное явление может быть связано с ионной конкуренцией основных катионов (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) с ионами Cu^{2+} за сайты связывания (биотические лиганды) на поверхности гидробионтов [12, 13]. Напротив, совместное действие высокой концентрации Cu^{2+} (0,025 мг/л) и минерализации (2,0 г/л NaCl) вызывало синергический эффект, приводя к гибели всех тест-организмов. Возможно, данный эффект связан со значительным нарушением осмотического баланса у гидробионтов, что ослабляет их защитные ба-

рьеры и повышает уязвимость к дополнительному воздействию меди. Так, в эксперименте на устрицах *Corbicula japonica* Prime, 1864 авторы пришли к выводу, что в условиях высокой солёности возрастают энергозатраты на поддержание клеточного гомеостаза, что впоследствии снижает выживаемость и линейные размеры при воздействии ТМ [14].

Во всех вариантах совместного действия Cu^{2+} и NaCl наблюдалось закономерное снижение плодовитости ветвистоусого рачка *C. dubia* с ростом минерализации (рис. 2). При концентрациях Cu^{2+} 0,005 и 0,01 мг/л плодовитость рачков в вариантах без добавления соли (индивидуальное действие меди) была значимо выше, чем в растворах, содержащих NaCl. Исключением из этой закономерности являлась смесь с минимальной добавкой NaCl (0,5 г/л) (рис. 2а, б).

Общая закономерность снижения плодовитости рачков с ростом минерализации в присутствии Cu^{2+} нарушалась только в одном варианте: при максимальной концентрации Cu^{2+} (0,025 мг/л) и минимальной добавки NaCl (0,5 г/л). В этих условиях репродуктивная способность *C. dubia* была в 4,2 раза выше, чем в варианте без добавления NaCl ($p < 0,05$) (рис. 1). Однако дальнейшее повышение минерализации полностью нивелировало этот положительный эффект. При внесении 1 г/л NaCl плодовитость снизилась в 6,6 раз, а при 2 г/л NaCl – в 63 раза по сравнению с вариантом минимальной минерализации (0,5 г/л).

Влияние органического вещества на токсичность меди. Для моделирования различных уровней минерализации применяли аналогичную схему эксперимента, добавляя в тестовую среду NaCl в трёх концентрациях (рис. 3, см. цв. вкладку VII). Внесение ОВ в виде ГК приводило к постепенному дозозависимому снижению смертности *C. dubia*. При наименьшей концентрации Cu^{2+} (рис. 3а) наблюдалась незначительная тенденция снижения токсичности при добавлении в тестируемую среду ГК. С увеличением концентрации Cu^{2+} (рис. 3б), снижение токсичности в присутствии ГК становилось более выраженным: смертность рачков снижалась в ответ на повышение доли ОВ, составляя 60, 10 и 0 % при добавлении 0,5; 1 и 2,5 % ГК соответственно. Статистически значимые различия были зарегистрированы для двух последних вариантов. Снижение токсичности сохранялось и при более высокой концентрации Cu^{2+} (рис. 3в). Добавление ГК в концентрациях 0,5; 1 и 2,5 % приводило к значительному сниже-

нию смертности до 0, 5 и 25 % соответственно, в то время как в среде без добавления ГК этот показатель составил 70 %.

Проявившийся в вариантах эффект свидетельствует об антагонизме между Cu^{2+} и ГК. Как правило, это связано с образованием малорастворимых органоминеральных комплексов в результате взаимодействия многих ТМ и ОВ [15]. Однако конкретные закономерности такого взаимодействия, зависящие от соотношения концентраций веществ, совместно присутствующих в водной среде, ранее подробно не исследовались.

В диапазоне концентраций Cu^{2+} от 0,005 до 0,025 мг/л, часто регистрируемых в природных водных объектах [16] и способных оказать хроническое токсическое действие на гидробионты, было установлено, что токсичность металла может снижаться за счёт присутствия в системе ОВ. Наименее выраженный защитный эффект ОВ наблюдался при минимальной концентрации Cu^{2+} , что закономерно, поскольку смертность церидафний в варианте, содержащем только медь, была исходно ниже.

Анализ плодовитости *C. dubia* подтвердил протекторное действие ОВ в отношении токсичности Cu^{2+} . Как и для показателя смертности, эффект был наиболее выражен при максимальной концентрации металла (0,025 мг/л). В этом варианте плодовитость рачков превышала показатель при индивидуальном действии Cu^{2+} в 6,9; 6,7 и 3,2 раза при добавлении 0,5; 1 и 2,5 % ГК соответственно. При концентрации Cu^{2+} 0,01 мг/л и 0,5% ГК плодовитость оставалась на уровне индивидуального действия Cu^{2+} , однако с увеличением концентрации ГК до 1 и 2,5 % она возрастала в 2,5 и 1,9 раз. Только при наименьшей концентрации Cu^{2+} плодовитость в вариантах с ГК была значимо ниже, чем в растворе, содержащем только медь (рис. 2а). Отсутствие положительного влияния ГК при низкой концентрации Cu^{2+} (0,005 мг/л), по-видимому, связано с конкурирующим действием двух стресс-факторов. Токсическое воздействие Cu^{2+} на этом уровне может находиться в субпороговой или пороговой области, не вызывая значимого угнетения репродуктивной функции [12]. В этих условиях само внесённое ОВ, особенно в высоких концентрациях (1–2,5 % ГК), способно выступать в качестве дополнительного фактора стресса. Известно, что гуминовые вещества в высоких дозах могут оказывать неспецифическое негативное воздействие на гидробионты, например, за счёт изменения осмотического баланса или свя-

зывания эссенциальных микроэлементов [17, 18]. Таким образом, наблюдаемое снижение плодовитости и смертности *C. dubia* в вариантах с низкой концентрацией Cu^{2+} (0,01 мг/л) в присутствии ГК по сравнению с её индивидуальным действием может быть результатом аддитивного эффекта двух слабых стрессовых воздействий, при котором вызванный стресс от ГК перевешивает его потенциальный протекторный потенциал.

В целом, результаты исследования согласуются с данными, полученными в почвенных экспериментах. В частности, в работе [19] показано, что органические удобрения защищали почвенные организмы от токсического действия ТМ, тогда как минеральные удобрения усиливали их негативный эффект.

Заключение

Большинство водных экосистем характеризуются динамическими изменениями химических и физико-химических параметров. Уровень минерализации и содержание ОВ подвержены как естественным природным колебаниям, так и меняются в результате антропогенной деятельности. В данном исследовании мы оценили влияние уровней минерализации и содержания ОВ в воде на токсикологический эффект трёх концентраций меди, регистрируемых в природных водных объектах.

Хронические токсикологические тесты на *C. dubia* показали, что выраженность токсического эффекта зависит не только от концентрации Cu^{2+} , но и от фоновых параметров среды. Умеренное повышение минерализации и содержания ОВ (в 3–3,1 и 1,3–1,8 раз относительно индивидуального действия Cu^{2+}) не оказывало негативного влияния либо повышало жизненные показатели тест-организмов в присутствии Cu^{2+} (0,005–0,025 мг/л), что может быть связано с адаптивными физиологическими ответами на слабый химический стресс. Однако дальнейшее увеличение минерализации (в 4,7–8,9 раз) приводило к усилению токсического действия Cu^{2+} . Напротив, дополнительное внесение ОВ (при уровне ХПК в 1,7–7,9 раз выше контрольного) достоверно снижало токсичность металла, что проявлялось в уменьшении смертности и плодовитости рачков.

В практике нормирования качества почв в России уже применяется подход, учитывающий их физико-химические свойства (например, гранулометрический состав, pH, содержа-

ние гумуса) для дифференциации предельно допустимых концентраций ЗВ. Полученные нами результаты свидетельствуют, что аналогичный подход необходим и для установления экологически обоснованных нормативов для водных сред, где минерализация и содержание ОВ являются **ключевыми факторами, модифицирующими токсичность**.

Авторы выражают благодарность О.А. Угаровой старшему инженеру лаборатории физиологии и токсикологии водных животных ИБВВ РАН за помощь в проведении экспериментов по биотестированию.

Часть экспериментальных работ выполнена в рамках государственного задания № 124032500015-7 «Роль абиотических и биотических факторов в формировании физиолого-биохимических и иммунологических показателей гидробионтов».

Литература

1. Олькова А.С., Ашихмина Т.Я. Факторы получения репрезентативных результатов биотестирования водных сред (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 22–30. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-022-030
2. Карманова И.В. Экологические аспекты водной токсикологии // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2008. № 7. С. 137–142.
3. Stuijzand S.C., Jonker M.J., van Ammelrooy E., Admiraal W. Species-specific responses to metals in organically enriched river water, with emphasis on effects of humic acids // Environ. Pollut. 1999. V. 106. No. 1. P. 115–121. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00052-4
4. Hall L.W.Jr., Anderson R.D. The influence of salinity on the toxicity of various classes of chemicals to aquatic biota // Crit. Rev. Toxicol. 1995. V. 25. No. 4. P. 281–346. doi: 10.3109/10408449509021613
5. Griffith M.B. Natural variation and current reference for specific conductivity and major ions in wadeable streams of the conterminous USA // Freshwater Sci. 2014. V. 33. No. 1. P. 1–17. doi: 10.1086/674704
6. Шестеркин В.П., Синькова И.С., Шестеркина Н.М. Солевой состав вод малых рек центральной части Хабаровска в период весеннего половодья // Региональные проблемы. 2022. Т. 25. № 3. С. 60–62. doi: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-60-62
7. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Паршакова Я.Н., Тиунов А.А. К проблеме отведения избыточных рассолов в водные объекты предприятиями калийной промышленности // Водное хозяйство России. 2010. № 3. С. 57–74.
8. Krodziewska M., Spyra A., Cieplik A. Assessment of pollution, and ecological status in rivers located in the Vistula and Oder river basins impacted by the mining industry in Central Europe (Poland) // Ecol. Indic. 2022. V. 144. Article No. 109505. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109505
9. Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test // Environ. Toxicol. Chem. 1984. V. 3. P. 425–434. doi: 10.1002/etc.5620030307
10. Александрова В.В. Применение метода биотестирования в анализе токсичности природных и сточных вод (на примере Нижневартовского района Тюменской области). Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гуманитар. ун-та, 2009. 94 с.
11. Cooper N.L., Bidwell J.R., Kumar A. Toxicity of copper, lead, and zinc mixtures to *dubia* and *Daphnia carinata* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2009. V. 72. No. 5. P. 1523–1528. doi: 10.1016/j.ecoenv.2009.03.002
12. De Schamphelaere K.A.C., Janssen C.R. Development and field validation of a biotic ligand model predicting chronic copper toxicity to *Daphnia magna* // Environ. Toxicol. Chem. 2004. V. 3. No. 6. P. 1365–1375. doi: 10.1897/02-626
13. Paquin P.R., Gorsuch J.W., Apte S., Batley G.E., Bowles K.C., Campbell P.G.C., Delos C.G., Di Toro D.M., Dwyer R.L., Galvez F., Gensemer R.W., Goss G.G., Hostrand C., Janssen C.R., McGeer J.C., Naddy R.B., Playle R.C., Santore R.C., Schneider U., Stubblefield W.A., Wood C.M., Wu K.B. The biotic ligand model: a historical overview // Comp. Biochem. Physiol. C: Toxicol. Pharmacol. 2002. V. 133. No. 1–2. P. 3–35. doi: 10.1016/S1532-0456(02)00112-6
14. Park K., Kwak I.S. Growth retardation and suppression of ubiquitin-dependent catabolic processes in the brackish water clam *Corbicula japonica* in response to salinity changes and bioaccumulation of toxic heavy metals // Environ. Pollut. 2023. V. 337. Article No. 122554. doi: 10.1016/j.envpol.2023.122554
15. Beveridge A., Pickering W.F. Influence of humate-solute interactions on aqueous heavy metal ion levels // Water Air Soil Pollut. 1980. V. 14. P. 171–185. doi: 10.1007/BF00291834
16. Скороходова А.А., Савичев О.Г. Содержание и формы миграции меди и цинка в природных водах Васюганского болота // Вестник Томского государственного университета. 2013. № 368. С. 166–172.
17. Timofeev M.A., Shatilina Z.M., Bedulina D.S., Menzel R., Steinberg C.E.W. Natural organic matter (NOM) has the potential to modify the multixenobiotic resistance (MXR) activity in freshwater amphipods *Eulimnogammarus cyaneus* and *E. verrucosus* // Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol. 2007. V. 146. No. 4. P. 496–503. doi: 10.1016/j.cbpb.2006.11.017
18. Steinberg C.E.W., Paul A., Pflugmacher S., Meinelt T., Klöcking R., Wiegand C. Pure humic substances have the potential to act as xenobiotic chemicals – A review // Fresenius Environ. Bull. 2003. V. 12. No. 5. P. 391–401.

19. Pieńkowska A., Fleischmann J., Drabesch S., Merbach I., Wang G., Rocha U., Reitz T., Muehe E.M. Long-term organic fertilization shields soil prokaryotes from metal stress while mineral fertilization exacerbates it // *Environ. Pollut.* 2025. V. 382. Article No. 126747. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126747

References

1. Olkova A.S., Ashikhmina T.Ya. Factors of obtaining representative results of bioassay of aquatic environments (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 22–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2021-2-022-030

2. Karmanova I.V. Ecological aspects of aquatic toxicology // *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. No. 7. P. 137–142 (in Russian).

3. Stuijzand S.C., Jonker M.J., van Ammelrooy E., Admiraal W. Species-specific responses to metals in organically enriched river water, with emphasis on effects of humic acids // *Environ. Pollut.* 1999. V. 106. No. 1. P. 115–124. doi: 10.1016/S0269-7491(99)00052-4

4. Hall L.W.Jr., Anderson R.D. The influence of salinity on the toxicity of various classes of chemicals to aquatic biota // *Crit. Rev. Toxicol.* 1995. V. 25. No. 4. P. 281–346. doi: 10.3109/10408449509021613

5. Griffith M.B. Natural variation and current reference for specific conductivity and major ions in wadeable streams of the conterminous USA // *Freshwater Sci.* 2014. V. 33. No. 1. P. 1–17. doi: 10.1086/674704

6. Shesterkin V.P., Sinkova I.S., Shesterkina N.M. Salt composition in waters of the Khabarovsk central part small rivers during spring flood // *Regional'nye Problemy*. 2022. V. 25. No. 3. P. 60–62 (in Russian). doi: 10.31433/2618-9593-2022-25-3-60-62

7. Lepikhin A.P., Lyubimova T.P., Parshakova Ya.N., Tiunov A.A. To the problem of discharge of excess brines into water bodies by potash industry enterprises // *Vodnoe khozyaistvo Rossii*. 2010. No. 3. P. 57–74 (in Russian).

8. Krodkiewska M., Spyra A., Cieplik A. Assessment of pollution, and ecological status in rivers located in the Vistula and Oder river basins impacted by the mining industry in Central Europe (Poland) // *Ecol. Indic.* 2022. V. 144. Article No. 109505. doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109505

9. Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test // *Environ. Toxicol. Chem.* 1984. V. 3. P. 425–434. doi: 10.1002/etc.5620030307

10. Aleksandrova V.V. Application of the biotesting method in the analysis of toxicity of natural and waste waters (on the example of the Nizhnevartovsk district of the Tyumen region). Nizhnevartovsk: Izdatelstvo Nizh-

nevartovskogo humanitarnogo universiteta, 2009. 94 p. (in Russian)

11. Cooper N.L., Bidwell J.R., Kumar A. Toxicity of copper, lead, and zinc mixtures to *Ceriodaphnia dubia* and *Daphnia carinata* // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2009. V. 72. No. 5. P. 1523–1528. doi: 10.1016/j.ecoenv.2009.03.002

12. De Schamphelaere K.A.C., Janssen C.R. Development and field validation of a biotic ligand model predicting chronic copper toxicity to *Daphnia magna* // *Environ. Toxicol. Chem.* 2004. V. 3. No. 6. P. 1365–1375. doi: 10.1897/02-626

13. Paquin P.R., Gorsuch J.W., Apte S., Batley G.E., Bowles K.C., Campbell P.G.C., Delos C.G., Di Toro D.M., Dwyer R.L., Galvez F., Gensemer R.W., Goss G.G., Hostrand C., Janssen C.R., McGeer J.C., Naddy R.B., Playle R.C., Santore R.C., Schneider U., Stubblefield W.A., Wood C.M., Wu K.B. The biotic ligand model: a historical overview // *Comp. Biochem. Physiol. C: Toxicol. Pharmacol.* 2002. V. 133. No. 1–2. P. 3–35. doi: 10.1016/S1532-0456(02)00112-6

14. Park K., Kwak I.S. Growth retardation and suppression of ubiquitin-dependent catabolic processes in the brackish water clam *Corbicula japonica* in response to salinity changes and bioaccumulation of toxic heavy metals // *Environ. Pollut.* 2023. V. 337. Article No. 122554. doi: 10.1016/j.envpol.2023.122554

15. Beveridge A., Pickering W.F. Influence of humate-solute interactions on aqueous heavy metal ion levels // *Water Air Soil Pollut.* 1980. V. 14. P. 171–185. doi: 10.1007/BF00291834

16. Skorokhodova A.A., Savichev O.G. Content and migration forms of copper and zinc in natural waters of the Vasyugan swamp // *Tomsk State University Journal*. 2013. No. 368. P. 166–172 (in Russian).

17. Timofeev M.A., Shatilina Z.M., Bedulina D.S., Menzel R., Steinberg C.E.W. Natural organic matter (NOM) has the potential to modify the multixenobiotic resistance (MXR) activity in freshwater amphipods *Eulimnogammarus cyaneus* and *E. verrucosus* // *Comp. Biochem. Physiol. B Biochem. Mol. Biol.* 2007. V. 146. No. 4. P. 496–503. doi: 10.1016/j.cbpb.2006.11.017

18. Steinberg C.E.W., Paul A., Pflugmacher S., Meinelt T., Klöcking R., Wiegand C. Pure humic substances have the potential to act as xenobiotic chemicals – A review // *Fresenius Environ. Bull.* 2003. V. 12. No. 4. P. 391–401.

19. Pieńkowska A., Fleischmann J., Drabesch S., Merbach I., Wang G., Rocha U., Reitz T., Muehe E.M. Long-term organic fertilization shields soil prokaryotes from metal stress while mineral fertilization exacerbates it // *Environ. Pollut.* 2025. V. 382. Article No. 126747. doi: 10.1016/j.envpol.2025.126747

Продукционные характеристики артемии (Crustacea, Anostraca *Artemia* spp.) в озёрах разного типа минерализации на юге Западной Сибири

© 2026. Л. В. Веснина, д. б. н., с. н. с.,
Д. М. Безматерных, д. б. н., зам. директора по научной работе,
М. В. Лассый, лаборант, Ю. А. Веснин, инженер,
Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения
Российской академии наук,
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1,
e-mail: artemia.vesnina@mail.ru

Приведены результаты исследований гидрохимических и продукционных характеристик *Artemia* spp. из 8 разнотипных озёр юга Западной Сибири, проведённых с июля по октябрь 2024 г. По преобладающим анионам гипергалинные озёра были подразделены на 3 типа: гидрокарбонатные (оз. Танатар III), сульфатные (оз. Мормышанское) и хлоридные (озёра Кулундинское, Малое Яровое, Большое Яровое, Малиновое, Кучукское, Малое Шкло). Установлено, что зоопланктон гипергалинных озёр включает партеногенетические и бисексуальные популяции рачка *Artemia* spp. Определены продукционные характеристики популяций артемии под влиянием основных факторов окружающей среды – характеристик минерализации рапы. Плодовитость самок *A. parthenogenetica* в озёрах хлоридного типа не имеет значительного отличия от плодовитости самок *Artemia* sp. Kazakhstan ($p > 0,05$). При этом выявлено значительное отличие самок рачка, обитающих в хлоридных озёрах, от самок, обитающих в сульфатных (коэффициенты Краскела-Уоллиса $H = 18,13$; $p < 0,01$) и гидрокарбонатных ($H = 16,40$; $p < 0,01$) озёрах. Между самками из сульфатных и гидрокарбонатных озёр значительного отличия не выявлено. Наименьшая плодовитость артемии была характерна для рачков из озёр хлоридного типа.

Ключевые слова: гипергалинные озёра, жаброногие рачки, партеногенетические и бисексуальные популяции, типы озёр, солёность.

Artemia spp. (Crustacea, Anostraca) productivity characteristics in lakes with different salinity in the southern Western Siberia

© 2026. L. V. Vesnina ORCID: 0000-0003-1325-9030, D. M. Bezmaternykh ORCID: 0000-0002-7747-4939,
M. V. Lassyy ORCID: 0000-0003-4042-5858, Yu. A. Vesnin ORCID: 0000-0003-1325-9030,
Institute of Water and Environmental Problems of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences,
1, Molodyozhnaya St., Barnaul, Russia, 656038,
e-mail: artemia.vesnina@mail.ru

The results of a study of the hydrochemical and production characteristics of *Artemia* spp. in eight different types of lakes in southern Western Siberia are presented. The research was conducted from July to October 2024. All of the studied lakes are shallow, with the maximum depth recorded in Lake Bolshoye Yarovoye (7.4 m) and Lake Maloye Yarovoye (5.0 m). They are located in the arid and semi-arid zones of the Kulunda Plain. The salinity of the studied lakes in the Altai Krai varied greatly, ranging from 41.2 ± 1.3 (Lake Maloe Shklo) to 251 ± 36 g/L (Lake Kuchuk). Based on the results of hydrochemical analysis, three types of lakes were identified: hydrocarbonate (Lake Tanatar III) with a dominant bisexual population of *Artemia* sp. Kazakhstan, sulphate (Lake Mormyshanskoe) with a dominant parthenogenetic population of *A. parthenogenetica*, and chloride (lakes Kuchuk, Kulunda, Maloye Yarovoye, Bolshoye Yarovoye, Maloye Shklo, Malinovoye) – represented by both populations (parthenogenetic and bisexual). We studied 817 females of *Artemia* parthenogenetic and bisexual populations for morphometric analysis. The overall fertility of *Artemia* sp. Kazakhstan and *A. parthenogenetica* females does not differ significantly. However, a significant difference was found in the fertility of female crustaceans inhabiting chloride and sulphate lakes (Kruskal – Wallis test $H = 18.13$; $p < 0.01$) and hydrocarbonate lakes ($H = 16.40$; $p < 0.01$). No significant difference was found between females from sulphate and hydrocarbonate lakes ($p > 0.05$). Thus, females from hyperhaline chloride lakes are characterised by the lowest fertility. The most informative morphometric indicators for assessing pro-

ductivity are the dimensional characteristics of the ovary. Females of the chloride-type lake crustacean had the smallest ovary length and width, which is one of the reasons for their lowest fertility.

Keywords: hyperhaline lakes, branchiopods, parthenogenetic and bisexual populations, lake types, salinity.

В Западной Сибири естественный ареал рачка артемии приурочен к аридной и полупустынной зонам равнины и ограничен с севера линией Барабинск – Тюкалинск – Ишим – Шадринск, а с юга примыкает к Казахстанскому ареалу рачка в гипергалинных озёрах зоны полупустынь. Существующие популяции жаброногого рачка размножаются партеногенетически и половым путём. Из около 470 описанных популяций артемии 36 % размножаются облигатным партеногенезом [1]. В водоёмах юга Западной Сибири большинство популяций артемии являются партеногенетическими, исключения составляют популяции в озёрах Танатар III, Малое Шкло, Кучукское, в которых отмечены и бисексуальные популяции. Размножение артемии может осуществляться откладыванием яиц и живорождением, при этом выделяют два типа яиц: летние (тонкоскорлуповые) и цисты (толстоскорлуповые, диапаузирующие). Из тонкоскорлуповых яиц выклев науплий осуществляется после вымётывания их самкой. Толстоскорлуповые яйца содержат эмбрионы на стадии гастролы, покрытые толстой оболочкой, находящиеся в состоянии диапаузы. В исследованных гипергалинных озёрах отмечено 3–4 поколения рачка *Artemia* spp. Период созревания, рост, размножение и репродуктивная характеристика каждого поколения зависят от факторов внешней среды, в основном характеристик минерализации рапы [2]. Под продукционными характеристиками,

помимо величины прироста биомассы популяции за определённый промежуток времени, также понимают интенсивность размножения в разных условиях, а также характеристики факторов внешней среды, влияющих на развитие популяции.

Целью данной работы является анализ плодовитости и некоторых морфометрических признаков половозрелых особей рачка *Artemia* spp. партеногенетических и бисексуальных популяций под влиянием различных типов солёности рапы.

Объекты и методы исследования

В 2024 г. (июль, август, сентябрь, октябрь) было обследовано 8 гипергалинных озёр: Мормышанское, Кучукское, Кулундинское, Малое Яровое, Большое Яровое, Малое Шкло, Танатар III, Малиновое. Озёра находятся на западе Алтайского края (рис. 1).

Акватория исследованных гипергалинных озёр значительно различалась по площади: от 1,3 (Малое Шкло) до 66,7 км² (Большое Яровое). К крупным по площади водоёмам относятся озёра Кулундинское (728 км²) и Кучукское (181 км²). Все водоёмы мелководные, максимальная глубина отмечена в озёрах Большое Яровое (7,4 м) и Малое Яровое (5,0 м). Изученные озёра расположены в аридной и полупустынной зонах Западно-Сибирской низменности. Они занимают бессточные котловины в осадочных породах. Подпитка



Рис. 1. Картосхема района исследований
Fig. 1. Cartography of the study area

осуществляется подземным и, в большей степени, поверхностным стоком, включая сток впадающих рек [2, 3].

Анализ химического состава рапы изученных озёр проводили стандартными методами в лаборатории биогеохимии ИВЭП СО РАН. Отбор и обработка проб осуществлялись согласно общепринятым методам и методикам. Разделение вод по солёности проводили с использованием классификации А.В. Щербакова [4]. Сбор гидробиологического материала осуществляли малой планктонной сетью Апштейна (размер ячеек 64 мкм) и камерально обрабатывали в соответствии со стандартными методиками [5]. Консервацию проб проводили 4 % раствором формалина.

Для морфометрического анализа было изучено 817 самок рачка артемии партеногенетических и бисексуальных популяций. Анализ проводили по 3 пластическим признакам: длина тела (*tl*), длина овисака (*ol*), ширина овисака (*ow*). Для характеристики плодовитости рачков ежемесячно отбирали 50–100 экземпляров живых овулятивных самок. Просчитывали количество эмбрионов (науплиусов, летних яиц, цист). Обработку проб проводили с использованием стереомикроскопа МБС-10 с окуляр-микрометром.

Статистическую обработку данных выполняли по общепринятым методикам [6] с применением программ MS Excel и Statistica 12.

Результаты и обсуждение

Солёность воды – важный экологический лимитирующий фактор для размножения водных беспозвоночных. Некоторые из них обладают высокой эвригалинностью и могут размножаться в её пределах от 16 до 280 ‰ (*Artemia* sp.; *Diaptomus salinus* Dad.) [7]. Промежуточное положение между морской и пресноводной фауной занимают солоноватоводные виды, диапазон размножения которых ограничен солёностью 5–8 ‰. В работе [8] доказано, что солёность 5–8 ‰ – универсальный барьер для ряда функций организма, в том числе и для размножения ракообразных. Позже в работах [9, 10] была отмечена неравноценность зон барьерной солёности и выделены основные границы хорогалинных зон (для океана > 50 ‰, для Каспия > 5,5 ‰, для Арала > 51 ‰). Для морских видов она является нижней, а для пресноводных – верхней границей жизнедеятельности и чаще всего становится предлетальной или даже летальной. Как правило, степень эвригалинности яиц и

вышедшей из них молоди намного меньше, чем у взрослых животных.

Возможность прохождения этапа воспроизводства в условиях наиболее оптимальных границ солёности у гидробионтов достигается в основном путём миграции в воду с благоприятной для размножения солёностью. У некоторых ракообразных необходимость миграции эволюционно закончилась переходом от личиночного к прямому развитию, сокращением числа личиночных стадий и увеличением продолжительности эмбриогенеза, что обеспечивает более надёжную защиту развивающегося зародыша от воздействия неблагоприятных факторов среды в выводковых камерах (*Claudocera*) или в овисаках (*Artemia*) [3].

Рассматривая репродукцию ракообразных как класса в целом, в работе [11] делается вывод, что для размножения большинства видов требуется среда с определённой солёностью. Воспроизводство ракообразных зависит от сочетания температуры и солёности: при повышении солёности температурные границы размножения смещаются в более низкую сторону. Наоборот, при опреснении ракообразные начинают процесс воспроизводства при более высокой температуре.

Значение солёности водной среды является лимитирующим фактором для *Artemia* spp. Отмечено, что граница оптимальных условий воспроизводства рачка по минерализации воды в условиях юга Западной Сибири находится в пределах 20–280 г/л [2]. Степень эвригалинности цист рачка и науплиусов при его живорождении значительно меньше, чем у взрослых рачков [8], поэтому солёность воды не является критическим фактором для науплиусов в весенний период и для репродукции рачков при наличии постоянной пресной подпитки гипергалинных озёр.

Величина минерализации исследованных нами в 2024 г. озёр Алтайского края сильно различалась – от $41,2 \pm 1,3$ (оз. Малое Шкло) до 251 ± 36 г/л (оз. Кучукское) (табл.).

В работе [12] показано наличие тенденции обратной корреляционной зависимости видового состава зоопланктона в пресноводных озёрах Алтайского края от общей минерализации воды ($r = -0,58 \pm 0,15$ при $p < 0,05$). По нашим данным, гипергалинные водоёмы представлены только двумя галофильными видами: бисексуальными популяциями *Artemia* sp. Kazakhstan и партеногенетическими популяциями *A. parthenogenetica*.

Кроме общей солёности, на условия обитания и воспроизводства гидробионтов оказывает влия-

Таблица / Table

Химический состав рапы гипергалинных озёр юга Западной Сибири
Brine chemical composition in hyperhaline lakes in the south of Western Siberia

Тип Type	Озеро Lake	Солёность, г/л Salinity, g/L	Содержание, г/л / Content, g/L					
			HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺
Гидрокар- бонатный Bicarbonate	Танатар III Tanatar III	110,0 ± 2,2	43,5 ± 0,9	1,04 ± 0,05	11,35 ± 0,10	0,004 ± 0,000	0,17 ± 0,02	37,0 ± 0,8
Сульфатный Sulfate	Мормы- шанское Mormy- shanskoe	159 ± 6	1,21 ± 0,04	71,8 ± 3,6	32,5 ± 0,6	0,103 ± 0,001	1,44 ± 0,14	52,1 ± 1,6
Хлоридный Chloride	Кучукское Kuchukskoe	251 ± 36	0,17 ± 0,00	6,9 ± 1,2	146 ± 23	0,166 ± 0,034	1,39 ± 0,14	97 ± 14
	Кулундинское Kulundinskoe	57,2 ± 0,8	1,34 ± 0,06	6,1 ± 0,6	31,7 ± 0,4	0,272 ± 0,037	7,22 ± 0,12	10,27 ± 0,38
	Малое Яровое Maloe Yarovoe	152 ± 34	0,50 ± 0,11	0,63 ± 0,10	93 ± 20	0,147 ± 0,025	4,0 ± 0,8	54 ± 13
	Большое Яровое Bolshoe Yarovoe	130,3 ± 2,7	0,68 ± 0,02	3,7 ± 0,5	81,7 ± 1,7	0,566 ± 0,012	12,70 ± 0,35	30,8 ± 1,5
	Малое Шкло Maloe Shklo	41,2 ± 1,3	3,8 ± 0,5	9,0 ± 1,4	12,9 ± 0,5	0,023 ± 0,001	0,26 ± 0,07	14,3 ± 0,4
	Малиновое Malinovoe	162,4 ± 3,0	1,27 ± 0,03	20,1 ± 2,0	80,0 ± 0,7	0,199 ± 0,001	1,42 ± 0,02	59,4 ± 1,0

ние ионный состав воды [13], который определяет осморегуляцию гидробионтов. От него зависят общий благоприятный солевой диапазон выживания животных на разных стадиях развития.

По преобладающим анионам, гипергалинные озёра были подразделены на 3 типа (табл.): гидрокарбонатные (оз. Танатар III), сульфатные (оз. Мормышанское) и хлоридные (озёра Кулундинское, Малое Яровое, Большое Яровое, Малиновое, Кучукское, Малое Шкло). Эти озёра характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией среды. В гидрокарбонатных водах pH составляла $9,7 \pm 0,1$, сульфатных – $8,1 \pm 0,1$, а в хлоридных диапазон pH колебался от 7,1 до 8,8.

Гидрокарбонатный тип водоёмов (оз. Танатар III) представлен *Artemia* sp. Kazakhstan; сульфатный тип водоёмов (оз. Мормышанское) – *A. parthenogenetica*. Хлоридный тип водоёмов представлен *Artemia* sp. Kazakhstan (озёра Кучукское, Малое Шкло) и *A. parthenogenetica* (озёра Кулундинское, Малое Яровое, Большое Яровое, Малиновое).

Для сравнения продукционных и морфометрических показателей партеногенетической

и бисексуальной популяций в различных типах озёр был построен график Box Plot, а также рассчитаны коэффициенты Краскела-Уоллиса (H), показывающие статистическую значимость различий между выборками (рис. 2). Плодовитость самок *A. parthenogenetica* в озёрах хлоридного типа не имеет значительного отличия от плодовитости самок *Artemia* sp. Kazakhstan ($p > 0,05$). Однако, выявлено значительное отличие самок рачка, обитающих в хлоридных озёрах, от самок, обитающих в сульфатных ($H = 18,13; p < 0,01$) и гидрокарбонатных ($H = 16,40; p < 0,01$) озёрах. Между самками из сульфатных и гидрокарбонатных озёр значительного отличия не выявлено. Таким образом, содержание хлоридов в рапе влияет на общую плодовитость самок рачка артемии.

Анализ длины тела (tl) выявил значительное отличие самок рачков *Artemia* sp. Kazakhstan от самок *A. parthenogenetica* в озёрах хлоридного типа ($H = 37,14; p < 0,01$), а также от самок в озере гидрокарбонатного типа ($H = 28,14; p < 0,01$). Самки *A. parthenogenetica* в озёрах хлоридного типа не имеют отличия от

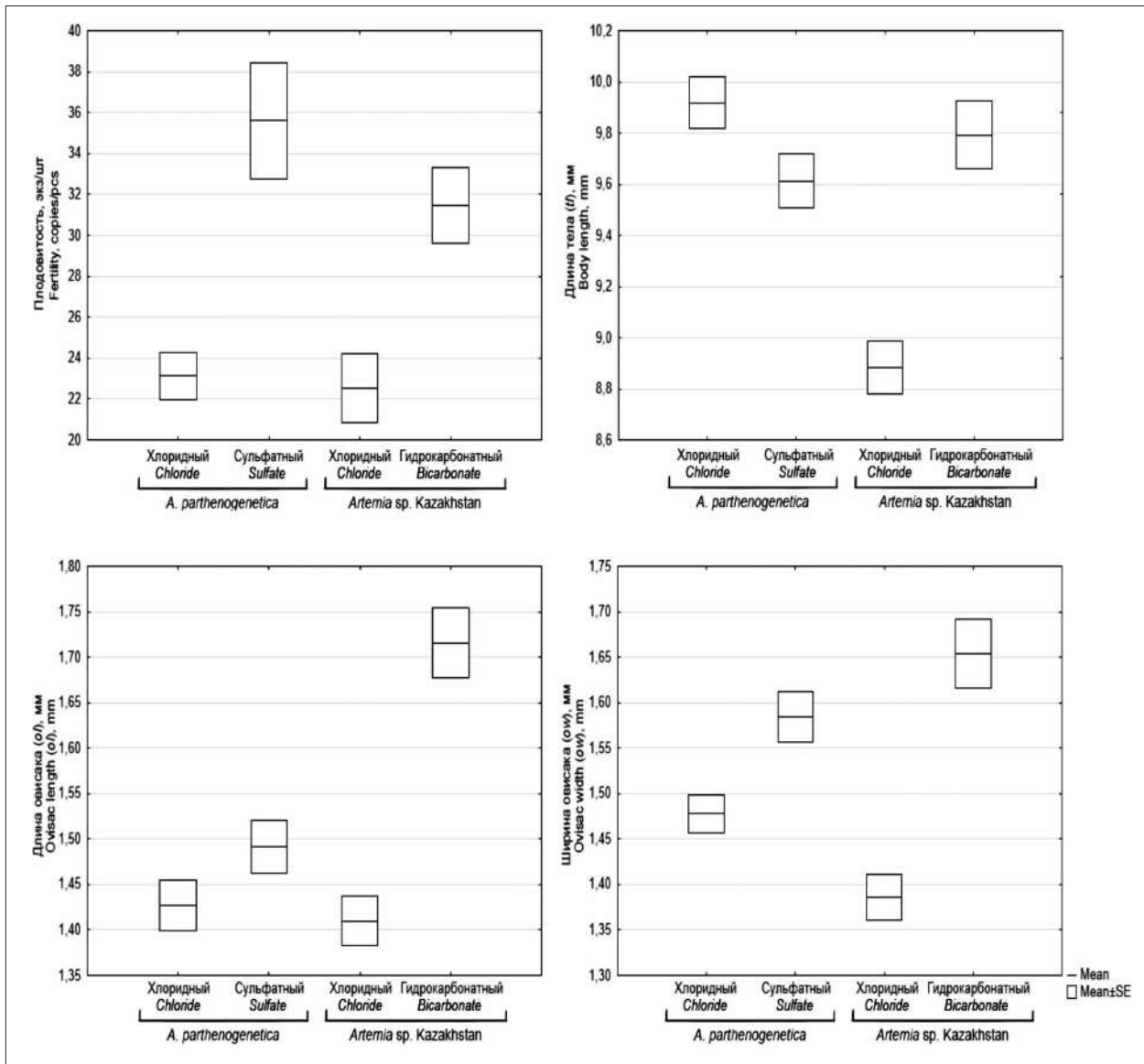


Рис. 2. Сравнение продукционных и морфометрических показателей *Artemia* spp. из разных типов гипергалинных озёр юга Западной Сибири

Fig. 2. *Artemia* spp. production and morphometric indices in different types of hyperhaline lakes in the south of Western Siberia

самок рачка в озере сульфатного типа. Между самками *Artemia* spp. из озёр сульфатного и гидрокарбонатного типов также не выявлено отличий.

Наибольший показатель длины овисака (*ol*) выявлен у самок *Artemia* sp. Kazakhstan в озере гидрокарбонатного типа, которые значительно отличаются от самок из остальных типов озёр. *Artemia* sp. Kazakhstan и *A. parthenogenetica* в озёрах хлоридного типа не отличаются друг от друга. Между *A. parthenogenetica* в озёрах хлоридного и сульфатного типов также нет значимого отличия.

Анализ ширины овисака (*ow*), как и в случае с плодовитостью, самки рачка из озёр хлоридного типа значительно отличаются от рач-

ков из озёр сульфатного ($H = 10,62; p < 0,01$) и гидрокарбонатного типов ($H = 29,08; p < 0,01$). *Artemia* sp. Kazakhstan и *A. parthenogenetica* из озёр хлоридного типа также отличаются между собой ($H = 4,25; p = 0,04$). Между рачками из сульфатных и гидрокарбонатных озёр значимое отличие по этому показателю не выявлено. Таким образом, можно сделать вывод, что сильнее всего на продукционные и некоторые морфометрические характеристики негативно влияет содержание хлорид-ионов в рапе озёр.

Выполнен NMDS (Non-metric Multidimensional Scaling – неметрическое многомерное шкалирование) анализ, который позволил визуализировать полученные данные с помощью распределения продукционных

характеристик популяций в пространстве ординации (рис. 3). Полученная ординация методом Brey-Curtis является статистически значимой, т. к. величина стресса равна 0. Популяции артемии из сульфатных и карбонатных озёр значительно отличаются по продукционным характеристикам от популяций из хлоридных озёр (рис. 3). Различия между артемией из сульфатного озера особенно выражены и статистически значимы (более 95 % вероятности). При этом эти отличия превосходят различия между двумя видами артемии.

Влияние минерализации на репродуктивные характеристики артемии ранее было проанализировано другими исследователями на примере Алжирских популяций. Показано, что при самой высокой солёности (80 г/л) партеногенетические популяции имеют самые низкие показатели выживаемости (30 %) по сравнению с более 70 % для бисексуальных. При солёности воды 80 г/л самкам потребовалось относительно больше времени, чтобы произвести первое потомство с большим их

количеством, что привело к потенциально более высокой плодовитости артемии [14, 15]. Различия в выживаемости между двумя популяциями объясняется адаптацией бисексуальных популяций к более экстремальным условиям окружающей среды. Адаптация артемии к экстремальным условиям выражается несколькими характеристиками, такими как качество цист, летних яиц и живорождения, обеспечивающими выживание популяций [16, 17]. На примере популяций *A. franciscana* и *A. persimilis* из водоёмов Нового Света отмечено [18], что изменчивость качества потомства (цисты или науплии) отражает важную репродуктивную стратегию *Artemia* spp., обеспечивая выживание популяций, находящихся в нестабильных или стрессовых условиях при высокой солёности. При исследовании гипергалинных водоёмов Испании выявлено, что партеногенетические популяции лучше адаптировались к суровым условиям окружающей среды и показали самую большую длину тела и самые высокие темпы роста, по сравнению с

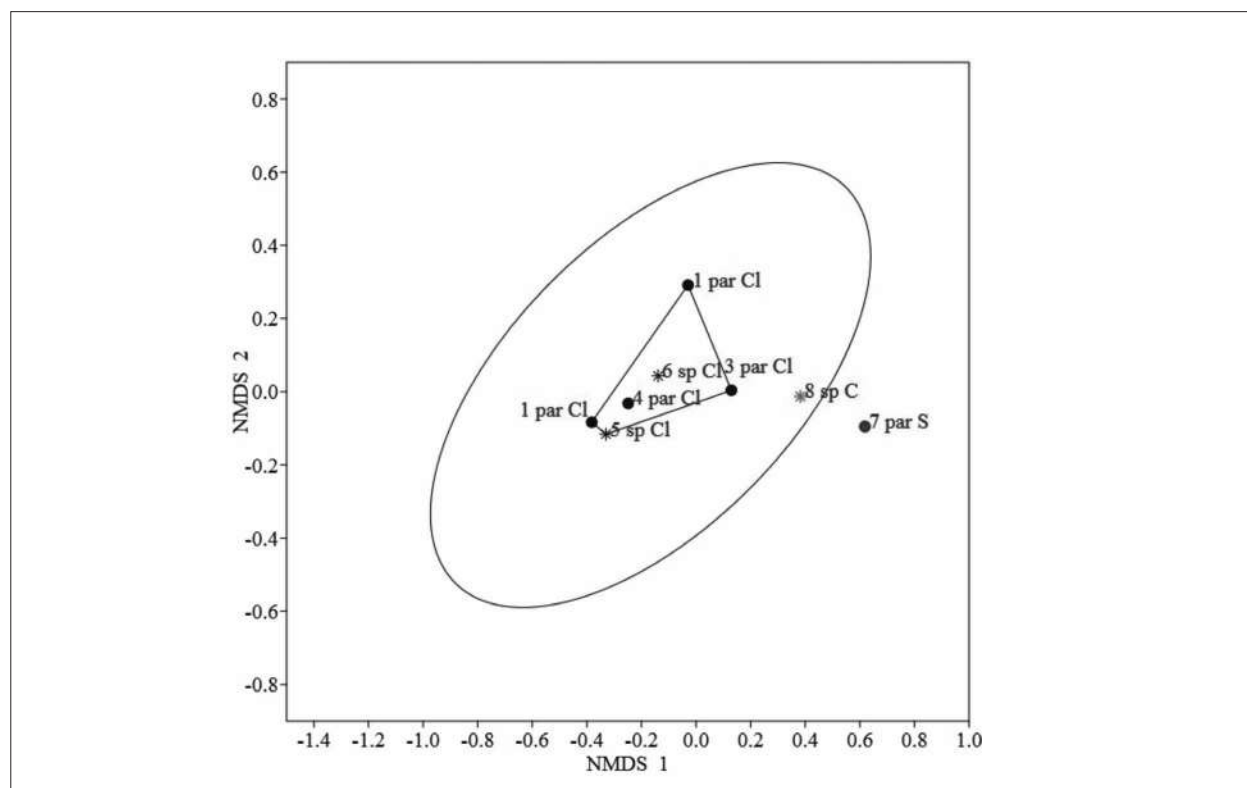


Рис. 3. Результаты NMDS-анализа продукционных характеристик изученных популяций артемии. Озёра: 1 – Кулундинское, 2 – Малиновое, 3 – Большое Яровое, 4 – Малое Яровое, 5 – Кучукское, 6 – Малое Шкло, 7 – Мормышанское, 8 – Танатар III. Виды: кружки – *A. parthenogenetica* (par), звёздочки – *Artemia* sp. Kazakhstan (sp). Типы минерализации озёр: Cl – хлоридные, C – карбонатные, S – сульфатные

Fig. 3. The results of NMDS analysis of the productivity characteristics in the studied artemia populations. Lakes: 1 – Kulundinskoe, 2 – Malinovoe, 3 – Bolshoe Yarovoe, 4 – Maloe Yarovoe, 5 – Kuchukское, 6 – Maloe Shklo, 7 – Mormyshanskoe, 8 – Tanatar III. Species: dots – *A. parthenogenetica* (par), stars – *Artemia* sp. Kazakhstan (sp). Types of lakes sanity: Cl – chloride, C – carbonate, S – sulfate

бисексуальными популяциями, подвергшими-ся воздействию растущей минерализации [19]. В работах [20, 21] показано, что партеногенетические популяции были лучше адаптированы к более высокой солёности, в то время как бисексуальные были адаптированы к более низкой солёности. В работе [22] также приводятся сведения об обнаружении аналогичных различий в моделях выживания и роста пяти бисексуальных популяций с Тихоокеанского побережья Мексики.

Заключение

По преобладающим анионам изученные гипергалинные озёра были подразделены на 3 типа: гидрокарбонатные (оз. Танатар III), сульфатные (оз. Мормышанское) и хлоридные (озёра Кулундинское, Малое Яровое, Большое Яровое, Малиновое, Кучукское, Малое Шкло). Установлено, что зоопланктон гипергалинных озёр включает партеногенетические (*A. parthenogenetica*) и бисексуальные (*Artemia* sp. Kazakhstan) популяции артемии. Определены продукционные характеристики популяций артемии под влиянием основных факторов окружающей среды – характеристик минерализации рапы. Наибольшее воздействие этих факторов на репродуктивные и морфометрические характеристики проявляется в озере сульфатного типа. Наименьшая плодовитость артемии была характерна для озёр хлоридного типа.

Таким образом, комплексное исследование гидрохимических условий обитания артемии и её продукционных характеристик может дать ценную информацию для понимания механизмов влияния основных экологических факторов окружающей среды на состояние её партеногенетических и бисексуальных популяций, что необходимо для прогнозирования запасов этого ценного биологического ресурса.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект №25-26-00148).

Литература

1. Литвиненко Л.И., Корентович М.А., Бойко Е.Г., Литвиненко А.И., Зенкович П.А. Артемия в гипергалинных водоёмах России (география, биоразнообразие, экология, биология и практическое использование). Тюмень: ГАУ Северного Зауралья, 2024. 372 с.
2. Веснина Л.В., Клепиков Р.А., Пищенко Е.В., Морузи И.В. Продуктивность цист рачка *Artemia* Leach,

1819 в гипергалинных озёрах Алтайского края. Новосибирск: ИЦ НГАУ «Золотой Колос», 2021. 147 с.

3. Веснина Л.В. Зоопланктон озёрных экосистем равнины Алтайского края. Новосибирск: Наука, 2002. 158 с.

4. Никоноров А.М. Справочник по гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 91 с.

5. Крылов А.В., Барышев И.А., Безматерных Д.М., Березина Н.А., Воронин Л.В., Герасимова А.А., Дудков М.О., Комулайнен С.Ф., Копытина Н.И., Корнева Л.Г., Косолапов Д.Б., Крылова Ю.В., Курашов Е.А., Курбатова С.А., Лазарева В.И., Маврин А.С., Метелёва Н.Ю., Минеева Н.М., Мухин И.А., Перова С.Н., Прокин А.А., Пряничникова Е.Г., Сажнев А.С., Селезнев Д.Г., Семенова А.С., Сигарева Л.Е., Тимофеева Н.А., Тихоненков Д.В., Чугунов В.К., Шарапова Т.А. Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань, 2024. 592 с. doi: 10.47021/monography_670cd0a47a4437.24064368

6. Zar J.H. Biostatistical analysis. New Jersey: Prentice Hall, 2010. 944 p.

7. Веснина Л.В., Безматерных Д.М. Влияние факторов окружающей среды на динамику зоопланктона солёного озера Кулундинское (Западная Сибирь) // Экология. 2023. № 3. С. 235–242. doi: 10.31857/S0367059723030095

8. Хлебович В.В. Критическая солёность биологических процессов. М.: Наука, 1974. 280 с.

9. Аладин Н.В. Концепция относительности и множественности зон барьерных солёностей // Журнал общей биологии. 1988. Т. 49. № 6. С. 825–833.

10. Аладин Н.В., Плотников И.С. Концепция относительности и множественности зон барьерных солёностей и формы существования гидросферы // Труды ЗИН РАН. 2013. № 7. С. 7–21.

11. Хмельёва Н.Н. Закономерности размножения ракообразных. Минск: Наука и техника, 1988. 208 с.

12. Фёдорова Л.С. Зависимость зоопланктона равнинных озёр Алтайского края от их солёности // Зоологические проблемы Сибири: материалы IV совещания зоологов Сибири. Новосибирск: Наука, 1972. С. 197–198.

13. Vesnina L.V., Bezmaternykh D.M. Long-term and seasonal dynamics of zooplankton in hypergaline lake Kulundinskoye (Kulunda Steppe, Russia) // Acta Biologica Sibirica. 2023. V. 9. P. 387–396. doi: 10.5281/zenodo.7927562

14. Chabet Dis C., Refes W., Varo I., Hontoria F., Amat F., Navarro J.C. Quality evaluation of *Artemia* cysts from three Algerian populations // Afr. J. Aquat. Sci. 2021. V. 46. No. 4. P. 464–472. doi: 10.2989/16085914.2021.1895052

15. Eimanifar A., Asem A., Djamali M., Wink M. A note on the biogeographical origin of the brine shrimp *Artemia urmiana* Günther, 1899 from Urmia Lake, Iran // Zootaxa. 2016. V. 4097. No. 2. P. 294–300. doi: 10.11646/zootaxa.4097.2.12

16. Amarouayache M., Kara M.H. Quality evaluation of a new strain of *Artemia* from Sebkha Ez-Zemoul, Algeria:

biometry, hatching and fatty acid composition // Vie Et Milieu – Life Environ. 2015. V. 65. P. 211–217.

17. Amarouayache M., Kara M.H. Aspects of life history of *Artemia salina* (Crustacea, Branchiopoda) from Algeria reared in different conditions of salinity // Vie Et Milieu – Life Environ. 2017. V. 67. P. 15–20.

18. Gajardo G., Beardmore J.A., Sorgeloos P. International study on *Artemia*. LXII. Genomic relationships between *Artemia franciscana* and *Artemia persimilis*, inferred from chromocentre numbers // Heredity. 2001. V. 87. Pt. 2. P. 172–177. doi: 10.1046/j.1365-2540.2001.00893.x

19. Amat F. Zygogenetic and parthenogenetic *Artemia* in Cadiz sea-side salterns // Marine Ecol. Prog. Series Oldend. 1983. V. 13. P. 291–293. doi: 10.3354/meps013291

20. Dhont J., Lavens P. Tank production and use of ongrown *Artemia* // Manual for the production and use of live food for aquaculture / Eds. P. Lavens, P. Sorgeloos. Rome: FAO Fisheries Technical Paper, 1996. P. 361–295.

21. Støttrup J., McEvoy L. Live feeds in marine aquaculture. Wiley, New Jersey USA Team RC. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Foundation for statistical computing. Vienna. Austria. 2008 [Электронный ресурс] <https://www.r-project.org/> (Дата обращения: 20.07.2020).

22. Castro-Mejía J., Castro-Barrera T., Hernández-Hernández L.H., Arredondo-Figueroa J.L., Castro-Mejía G., de Lara-Andrade R. Effects of salinity on growth and survival in five *Artemia franciscana* (Anostraca: Artemiidae) populations from Mexico Pacific Coast // Rev. Biol. Trop. 2011. V. 59. P. 199–206. doi: 10.15517/rbt.v59i1.3190

References

1. Litvinenko L.I., Korentovich M.A., Bojko E.G., Litvinenko A.I., Zenkovich P.A. *Artemia* in hypersaline water bodies of Russia (geography, biodiversity, ecology, biology and practical use). Tyumen: GAU Severnogo Zaural'ja, 2024. 372 p. (in Russian).

2. Vesnina L.V., Klepikov R.A., Pishhenko E.V., Moruzi I.V. Productivity of *Artemia* Leach, 1819 cysts in hypersaline lakes of the Altai Territory. Novosibirsk: IC NGAU “Zolotoj Kolos”, 2021. 147 p. (in Russian).

3. Vesnina L.V. Zooplankton of lake ecosystems in the Altai Krai plains. Novosibirsk: Nauka, 2002. 158 p. (in Russian).

4. Nikonorov A.M. Handbook of hydrochemistry. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989. 91 p. (in Russian).

5. Krylov A.V., Baryshev I.A., Bezmaternykh D.M., Berezina N.A., Voronin L.V., Gerasimova A.A., Dudakov M.O., Komulainen S.F., Kopytina N.I., Korneva L.G., Kosolapov D.B., Krylova Yu.V., Kurashov E.A., Kurbatova S.A., Lazareva V.I., Mavrin A.S., Meteleva N.Yu., Mineeva N.M., Mukhin I.A., Perova S.N., Prokin A.A., Pryanichnikova E.G., Sazhnev A.S., Seleznev D.G., Semenova A.S., Sigareva L.E., Timofeeva N.A., Tikhononkov D.V., Chugunov V.K., Sharapova T.A. Methods of hy-

drobiological research of inland waters. Yaroslavl: Filigran', 2024. 592 p. (in Russian). doi: 10.47021/monography_670cd0a47a4437.24064368

6. Zar J.H. Biostatistical analysis. New Jersey: Prentice Hall, 2010. 944 p.

7. Vesnina L.V., Bezmaternykh D.M. The influence of environmental factors on the dynamics of zooplankton in the saline Lake Kulundinskoye (Western Siberia) // Ecology. 2023. No. 3. P. 235–242 (in Russian). doi: 10.31857/S0367059723030095

8. Khlebovich V.V. Critical salinity of biological processes. Moskva: Nauka, 1974. 280 p. (in Russian).

9. Aladin N.V. The concept of relativity and multiplicity of barrier salinity zones // Journal of General Biology. 1988. V. 49. No. 6. P. 825–833 (in Russian).

10. Aladin N.V., Plotnikov I.S. The concept of relativity and multiplicity of barrier salinity zones and the form of existence of the hydrosphere // Proceedings of the Zoological Institute. 2013. No. 7. P. 7–21 (in Russian).

11. Khmeleva N.N. Patterns of reproduction in crustaceans. Minsk: Nauka i tehnika, 1988. 208 p. (in Russian).

12. Fedorova L.S. The dependence of zooplankton in the flat lakes of the Altai region on their salinity // Zoologicheskie problemy Sibiri: materialy IV soveshchaniya zoologov Sibiri. Novosibirsk: Nauka, 1972. P. 197–198 (in Russian).

13. Vesnina L.V., Bezmaternykh D.M. Long-term and seasonal dynamics of zooplankton in hypergaline lake Kulundinskoye (Kulunda Steppe, Russia) // Acta Biologica Sibirica. 2023. V. 9. P. 387–396. doi: 10.5281/zenodo.7927562

14. Chabet Dis C., Refes W., Varo I., Hontoria F., Amat F., Navarro J.C. Quality evaluation of *Artemia* cysts from three Algerian populations // Afr. J. Aquat. Sci. 2021. V. 46. No. 4. P. 464–472. doi: 10.2989/16085914.2021.1895052

15. Eimanifar A., Asem A., Djamali M., Wink M. A note on the biogeographical origin of the brine shrimp *Artemia urmiana* Günther, 1899 from Urmia Lake, Iran // Zootaxa. 2016. V. 4097. No. 2. P. 294–300. doi: 10.11646/zootaxa.4097.2.12

16. Amarouayache M., Kara M.H. Quality evaluation of a new strain of *Artemia* from Sebkhia Ez-Zemoul, Algeria: biometry, hatching and fatty acid composition // Vie Et Milieu – Life Environ. 2015. V. 65. P. 211–217.

17. Amarouayache M., Kara M.H. Aspects of life history of *Artemia salina* (Crustacea, Branchiopoda) from Algeria reared in different conditions of salinity // Vie Et Milieu – Life Environ. 2017. V. 67. P. 15–20.

18. Gajardo G., Beardmore J.A., Sorgeloos P. International study on *Artemia*. LXII. Genomic relationships between *Artemia franciscana* and *Artemia persimilis*, inferred from chromocentre numbers // Heredity. 2001. V. 87. Pt. 2. P. 172–177. doi: 10.1046/j.1365-2540.2001.00893.x

19. Amat F. Zygogenetic and parthenogenetic *Artemia* in Cadiz sea-side salterns // Marine Ecol. Prog. Series

Oldend. 1983. V. 13. P. 291–293. doi: 10.3354/meps013291

20. Dhont J., Lavens P. Tank production and use of ongrown *Artemia* // Manual for the production and use of live food for aquaculture / Eds. P. Lavens, P. Sorgeloos. Rome: FAO Fisheries Technical Paper, 1996. P. 361–295.

21. Støttrup J., McEvoy L. Live feeds in marine aquaculture. Wiley, New Jersey USA Team RC. 2013. R: A language and environment for statistical computing. Foundation for statistical computing. Vienna. Austria.

2008 [Internet resource] <https://www.r-project.org/> (Accessed: 20.07.2020).

22. Castro-Mejía J., Castro-Barrera T., Hernández-Hernández L.H., Arredondo-Figueroa J.L., Castro-Mejía G., de Lara-Andrade R. Effects of salinity on growth and survival in five *Artemia franciscana* (Anostraca: Artemiidae) populations from Mexico Pacific Coast // Rev. Biol. Trop. 2011. V. 59. P. 199–206. doi: 10.15517/rbt.v59i1.3190

Ихтиофауна и рыбное население водотоков национального парка «Койгородский»

© 2026. В. И. Пономарев, к. б. н., зав. отделом,
Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: ponomarev@ib.komisc.ru

В работе представлены оригинальные данные о составе ихтиофауны и структуре рыбного населения основных водотоков образованного в 2019 г. федерального национального парка «Койгородский». Его территория насыщена густой сетью малых лесных рек и ручьёв бассейнов рек Кобры и Вятки, входящих в речную систему р. Волги. Здесь же расположены истоки руч. Сенюк (водосбор р. Северной Двины). Полевые исследования выполнены в сентябре–октябре 2020 г., марте–июне 2021 г., апреле и октябре 2023 г. и августе 2025 г. с использованием классических методов исследований. Всего в водотоках парка «Койгородский» выявлено 11 видов рыб, относящихся к пяти семействам: уклейка, пескарь, язь, плотва, елец, голян обыкновенный, щука обыкновенная, налим, голец усатый, ёрш обыкновенный и окунь речной. В р. Суран повсеместно доминирует плотва, роль субдоминанта принадлежит ершу. В верховьях р. Летка преобладают два вида – уклейка и плотва. На участках р. Мытец в пределах территории парка доминирует пескарь, которому несколько уступает ёрш. В верховьях руч. Сенюк рыбное население представлено единственным видом – обыкновенным голянком. Отмечена бедность ресурсного потенциала рыбного населения верховьев рек Мытец и Летка. Это можно объяснить как естественными причинами (малая величина водотоков и лесные завалы), так и хозяйственной деятельностью человека (лесозаготовки, перелов, браконьерство). Представляются перспективными ихтиологические исследования водотоков парка в разные сезоны года, с особым вниманием к бассейну р. Фёдоровки, расположенной в южной части резервата.

Ключевые слова: фауна рыб, рыбное население, малые реки, особо охраняемые природные территории.

Ichthyofauna and fish population in the Koigorodsky National Park rivers

© 2026. V. I. Ponomarev ORCID: 0000-0002-0863-736X,
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: ponomarev@ib.komisc.ru

For the first time, information has been obtained on the composition of the ichthyofauna and the structure of the fish population in the main watercourses of the Koygorodsky Federal National Park (KFNP), which was established in 2019. The KFNP territory is characterized by a dense network of small forest rivers and streams in the basins of the Kobra and Vyatka rivers, which are part of the Volga River system. The KFNP also includes the headwaters of the Senyuk River (which is part of the Northern Dvina River system). Field studies were conducted in September–October 2020, March–June 2021, April and October 2023, and August 2025, using classical research methods. In total, 11 fish species of five families have been identified in the KFNP watercourses: *Alburnus alburnus*, *Gobio gobio*, *Leuciscus idus*, *Leuciscus leuciscus*, *Rutilus rutilus*, *Phoxinus phoxinus*, *Esox lucius*, *Lota lota*, *Barbatula barbatula*, *Gimnocephalus cernua*, and *Perca fluviatilis*. *Rutilus rutilus* dominates everywhere in the Suran River, and *G. cernua* plays the role of a subdominant. Two species – *A. alburnus* and *R. rutilus* predominate in the upper reaches of the Letka River. *Gobio gobio* dominates, and the *G. cernua* being slightly less common in the sections of the Mytets River within the KFNP territory. The fish population is represented by a single species, *P. phoxinus* in the upper reaches of the Senyuk River. The resource potential of the fish population is noted to be poor in the upper reaches of the Mytets and Letka rivers. In the future, it is promising to conduct studies of the fish population in the KFNP's rivers during different seasons, with a particular focus on the Fedorovka River basin located in the southern part of the reserve.

Keywords: fish fauna, fish population, small rivers, specially protected natural areas.

Система особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Республики Коми охватывает 13,7 % её площади, что почти вдвое больше среднего по России показателя. В последние годы она рассматривается как одна из наиболее репрезентативных, разветвлённых и динамично развивающихся на европейском севере России [1]. Именно эта система ООПТ обеспечивает эффективную защиту глобально значимого биоразнообразия, природных объектов и комплексов республики. Она включает 230 объектов общей площадью более 5,7 млн. га, в том числе четыре резервата федерального значения, среди которых созданный в 2019 г. национальный парк «Койгородский».

Этот парк нацелен на сохранение ландшафтов моренных равнин южной тайги и крупного массива имеющих высокую ценность первичных лесов [2]. Соседство с государственным заповедником «Нургуш» обеспечило создание надёжного природоохранного пояса на стыке территорий Республики Коми и Кировской области.

Территория парка «Койгородский» насыщена густой сетью малых лесных рек и ручьёв бассейнов рек Кобры и Вятки, входящих в речную систему р. Волги. Основная часть резервата занята водосборными площадями притоков р. Кобры (бассейн р. Волги). Свыше половины площади особо охраняемой природной территории занимает водосбор р. Мытец, около трети – р. Суран, более 10 % – р. Летки, чуть менее 5 % – р. Фёдоровки и ещё 1,1 % – руч. Сенюк (единственный водоток бассейна р. Северной Двины в границах парка «Койгородский»).

До учреждения национального парка «Койгородский» ихтиофаунистические исследования местных водотоков не проводились. Единственные имеющиеся в литературе сведения о рыбном населении сопредельных рек этого региона опубликовали известные отечественные ихтиологи Б.С. Лукаш [3] и П.А. Дрягин [4]. В то же время фауна рыб участков верхних течений вятских притоков рек Кобры и Летки (бассейн р. Волги), расположенных в южной части Республики Коми, оставалась практически неизученной. В последние годы появились работы, посвящённые изучению водной фауны национального парка «Койгородский» [5, 6], а также некоторых других ООПТ крайнего европейского северо-востока России [7–9].

Цель данной работы – представить полученные нами оригинальные результаты полевых исследований ихтиофауны и рыбного

населения основных водотоков национального парка «Койгородский».

Материал и методы исследований

Сбор и лабораторную обработку ихтиологических материалов осуществляли с использованием классических методов исследований [10]. Полевые работы выполнили в сентябре–октябре 2020 г., марте–июне 2021 г., апреле и октябре 2023 г. и августе 2025 г. преимущественно в ходе пеших маршрутов и с применением надувных лодок. Исследованиями охватили 15-километровый участок р. Мытец выше по течению от границы национального парка «Койгородский», русло р. Суран от места её впадения в р. Кобру до верховьев, а также участки руч. Сенюк и р. Летки в непосредственной близости от границы парка.

Отлов рыбы вели с использованием стандартного ряда ставных жаберных лесковых сетей с ячейёй 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм, а также сачков с мелкой ячейёй и крючковых орудий лова (во время открытой воды – спиннинг и поплавочная удочка, в подлёдный период – зимняя удочка). Регистрировали геопозицию и длительность постановки снастей, а также дату, время, величину и состав уловов. Измеряли промысловую длину отловленных рыб, взвешивали общую массу тела, определяли пол и степень половой зрелости. Относительную численность рыб оценивали при помощи показателя индексной оценки из расчёта количества отловленных за единицу времени и на единицу рыболовного усилия особей (экз./ус. час). Возраст рыб определяли по чешуе.

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили с использованием программных пакетов Microsoft Excel 2007, PAST 4.15 [11]. Для выполнения многомерного анализа данных методом главных координат (РСоА) в качестве экологической дистанции между объектами использовали расстояние Жаккара, а также хеммингово расстояние [12]. В таблице 3 и на рисунках приведены средние арифметические значения и ошибка средней.

Результаты и обсуждение

Практически все водотоки национального парка «Койгородский» представляют собой типичные неглубокие лесные речки и ручьи, шириной не более нескольких метров, с густо поросшими лесом высокими берегами и более или менее регулярно примыкающими

к нему придаточными водоёмами: курьями-старицами и озеровидными расширениями. Для них характерны образование многочисленных естественных лесных завалов и устиление дна фрагментами стволов и ветвей погибших деревьев.

Всего в ходе полевых исследований в бассейнах водотоков национального парка «Койгородский» выявлено 11 видов рыб, относящихся к пяти семействам (табл. 1). Кроме того, в реках Мытец и Суран обитает пока не идентифицированный нами вид миноги, обнаруженной в полупереваренном состоянии в пищеварительном тракте щуки.

Не исключено, что состав ихтиофауны парка может дополняться в связи с остающейся слабой степенью её изученности. По-прежнему совершенно не исследованы верховья р. Фёдоровки. Возможны весенние и осенние нерестовые, кормовые и зимовальные миграции рыб, населяющих нижерасположенные участки рек парка, и наличие редких видов.

Наибольшее число видов рыб – девять – обнаружено в р. Суран, гораздо лучше изу-

ченной по сравнению с другими водотоками национального парка (табл. 2). Лишь один вид – обыкновенный голянь, выявлен в руч. Сенюк. Состав ихтиофауны рек Мытец и Летка ограничивается шестью видами.

Степень сходства и различия видового состава фауны рыб исследованных водотоков по индексу Жаккара показана на рисунке 1. Обращают внимание близость ихтиофауны рек Суран и Летка, с одной стороны, и дистанцирование от них р. Мытец и руч. Сенюк, с другой стороны. При этом для водотоков национального парка «Койгородский» характерно отсутствие выраженного ядра ихтиофауны [13] (рис. 2): во всех водотоках обнаружен только обыкновенный голянь, щука и ёрш – в трёх из четырёх водных объектов, тогда как остальные виды – только в одном или двух.

Впервые список ихтиофауны рек Кобры и Летки в границах Республики Коми приведен в работе [14]. По-видимому, судя по отсутствию ссылок на использованные литературные источники, этот перечень составлен по аналогии с соседними реками и/или по

Таблица 1 / Table 1

Ихтиофауна национального парка «Койгородский» / Ichthyofauna in the Koigorodsky National Park

Отряд / Squad	Семейство / Family	Род / Genus	Вид / Species
Карпообразные Cypriniformes	Ельцовые Leuciscidae (Bonaparte, 1835)	<i>Alburnus</i> Rafinesque, 1820	Уклейка <i>Alburnus alburnus</i> (Linnaeus, 1758)
		<i>Gobio</i> Cuvier, 1816	Пескарь <i>Gobio gobio</i> (Linnaeus, 1758)
		<i>Leuciscus</i> Cuvier, 1816	Язь <i>Leuciscus idus</i> (Linnaeus, 1758)
		<i>Leuciscus</i> Cuvier, 1816	Елец <i>Leuciscus leuciscus</i> (Linnaeus, 1758)
		<i>Phoxinus</i> Rafinesque, 1820	Голянь обыкновенный <i>Phoxinus phoxinus</i> (Linnaeus, 1758)
		<i>Rutilus</i> Rafinesque, 1820	Плотва <i>Rutilus rutilus</i> (Linnaeus, 1758)
	Балиториевые Balitoridae (Swainson, 1839)	<i>Barbatula</i> Linck, 1790	Голец усатый <i>Barbatula barbatula</i> (Linnaeus, 1758)
Лососеобразные Salmoniformes	Шуковые Esocidae (Cuvier, 1816)	<i>Esox</i> Linnaeus, 1758	Щука <i>Esox lucius</i> (Linnaeus, 1758)
Трескообразные Gadiformes	Налимовые Lotidae (Jordan et Evermann, 1898)	<i>Lota</i> Oken, 1817	Налим <i>Lota lota</i> (Linnaeus, 1758)
Окунеобразные Perciformes	Окунёвые Percidae (Cuvier, 1816)	<i>Gimnocephalus</i> Bloch, 1793	Обыкновенный ёрш <i>Gimnocephalus cernua</i> (Linnaeus, 1758)
		<i>Perca</i> Linnaeus, 1758	Речной окунь <i>Perca fluviatilis</i> (Linnaeus, 1758)

Таблица 2 / Table 2

Список видов рыб, зарегистрированных в различных водотоках национального парка «Койгородский» / List of fish species detected in different rivers of the Koigorodsky National Park

Вид / Species	Водотоки / Watercourses			
	Мытец / Mytets	Суран / Suran	Сенюк / Senyuk	Летка / Letka
<i>Alburnus alburnus</i>	–	6,8	–	40,8
<i>Gobio gobio</i>	26,5	–	–	–
<i>Leuciscus idus</i>	–	0,3	–	–
<i>Leuciscus leuciscus</i>	–	0,3	–	–
<i>Phoxinus phoxinus</i>	11,8	0,3	100	1,3
<i>Rutilus rutilus</i>	–	54,7	–	39,5
<i>Barbatula barbatula</i>	11,8	–	–	–
<i>Esox lucius</i>	17,7	8,3	–	1,3
<i>Lota lota</i>	8,8	0,3	–	–
<i>Gimnocephalus cernua</i>	23,5	23,4	–	7,9
<i>Perca fluviatilis</i>	–	5,6	–	9,2

Примечание: числа – доля вида в составе рыбного населения; прочерк означает, что вид отсутствует или пока не обнаружен.

Note: numbers – the proportion of the species in the fish population; a dash means that species absent or not yet detected.

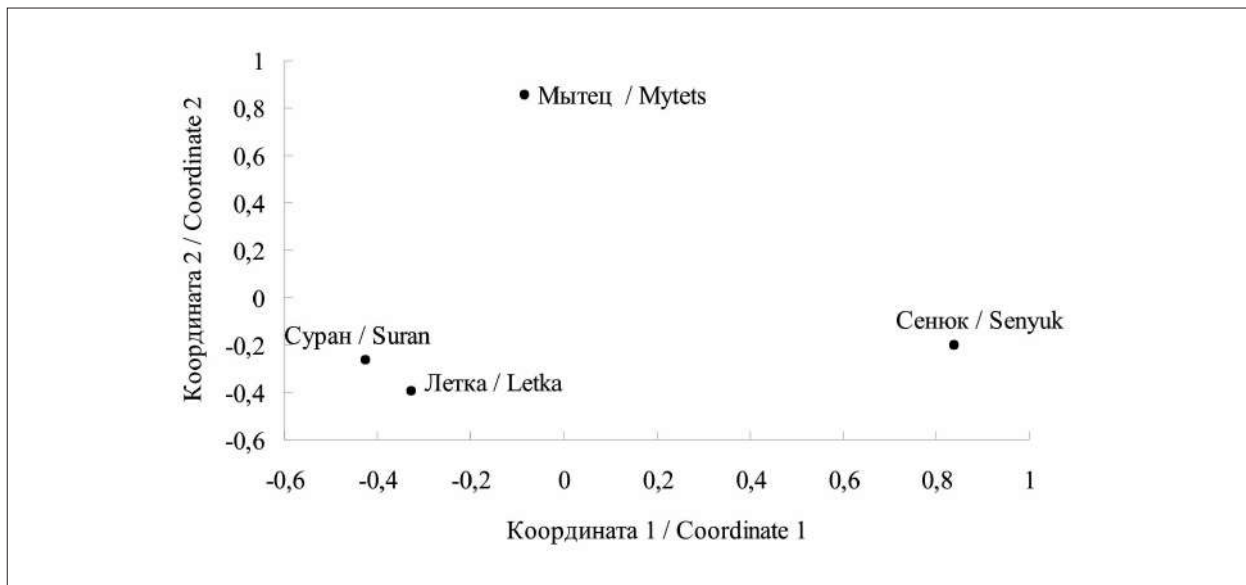


Рис. 1. Отображение сходства видового состава рыбного населения исследованных водотоков по индексу Жаккара в плоскости главных координат

Fig. 1. The similarity of the fish species composition in the studied watercourses by the Jaccard index in the plane of the principal coordinates

опросным данным. В него вошли стерлядь *Acipenser ruthenus* (Linnaeus, 1758), золотой карась *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758), язь *Leuciscus idus* (Linnaeus, 1758), голяны озёрный *Phoxinus phoxinus* (Pallas, 1814) и обыкновенный *P. phoxinus* (Linnaeus, 1758), сибирская ряпушка *Coregonus sardinella* (Valenciennes, 1848), европейский хариус *Thymallus thymallus* (Linnaeus, 1758), плотва *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758), густера *Blicca bjoerkna* (Linnaeus, 1758), лещ *Abramis brama* (Linnaeus, 1758), пескарь *Gobio gobio*

(Linnaeus, 1758), елец *Leuciscus leuciscus* (Linnaeus, 1758), верховка *Leucaspis delineates* (Heckel, 1843), голавль *Leuciscus cephalus* (Linnaeus, 1758), уклейка *Alburnus alburnus* (Linnaeus, 1758), голец усатый *Barbatula barbatula* (Linnaeus, 1758), щука *Esox lucius* (Linnaeus, 1758), налим *Lota lota* (Linnaeus, 1758), подкаменщик *Cottus gobio* (Linnaeus, 1758), ёрш *Gimnocephalus cernua* (Linnaeus, 1758) и окунь *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758) (всего 21 вид). Впоследствии использование Л.Н. Соловкиной [15] данных Б.С. Лукаша [3]

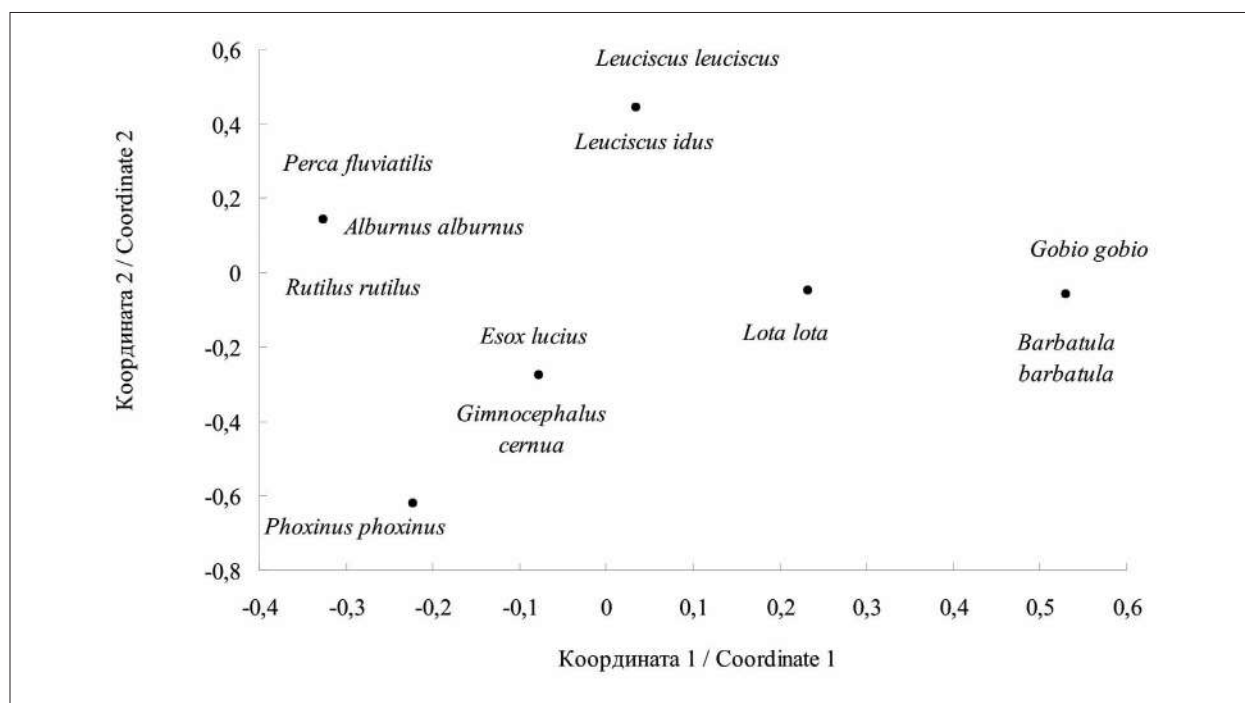


Рис. 2. Отображение парной встречаемости разных видов рыб в плоскости главных координат
Fig. 2. The pairwise occurrence of different fish species in the principal coordinate plane

и П.А. Дрягина [4] позволило ей составить свой список видов рыб, обитающих в бассейнах рек Кобры и Летки, на территории Коми АССР. В него вошли 23 вида из восьми семейств.

Во втором переработанном издании книги Н.А. Остроумова [16] девять из приведённых Л.Н. Соловкиной [15] видов рыб указаны для р. Летки и её притоков: голавль, обыкновенный голянь, жерех *Aspius aspius*, подуст *Chaondrostoma nasus*, лещ, усатый голец, европейский хариус и подкаменщик. При этом язь указан как для р. Кобры, так и для р. Летки.

В территорию национального парка «Койгородский» входят верховья руч. Сенюк – небольшой участок водосбора р. Лузы, относящийся к бассейну р. Северной Двины. В единственном источнике, касающемся непосредственно р. Лузы [17], высказано предположение, что сибирская минога «... вероятно, обитает в других притоках Лузы...». Для р. Лузы на территории Кировской области также отмечены стерлядь, европейский хариус (в большинстве мелких притоков) и подкаменщик. По неопубликованным данным Т.С. Осиповой (Управление «Комирыбвод»), ихтиофауна верхнего течения р. Лузы представлена такими видами, как минога (без уточнения вида), нельма, хариус, голавль, щука, окунь, плотва, елец, налим, ёрш, пескарь и подкаменщик. По сведениям местных жителей, в ряд притоков данного водотока, в

частности, реки Лопью и Соль, на нерест заходит атлантический лосось (сёмга).

При всей ограниченности и значительной ретроспективности доступной информации по составу рыбного населения рассматриваемого региона, очевидно, что она имеет отношение к существенно более обширным территориям Кировской области и Республики Коми, включающим участки водосборов рек Кобры, Летки и Лузы, чем непосредственно территории национального парка «Койгородский». По результатам полевых изысканий ихтиофауна этого резервата оказалась значительно беднее, чем изначально можно было ожидать. Это, прежде всего, связано с тем, что практически все водотоки, расположенные на его территории, представлены предельно малыми по величине истоками и участками самых их верховий.

Структура рыбного населения водотоков парка «Койгородский» различается в не менее существенной степени, чем его списочный состав – ихтиофауна (табл. 2). Действительно, выявлен широкий спектр характеристик рыбной части водных сообществ конкретных изученных водных объектов, от его представленности единственным видом рыб, обыкновенным голянём (в случае с руч. Сенюк) до практически равновзвешенного [18] состава рыбного населения (р. Мытец).

Наличие супердоминанта (плотвы, доля которой превысила половину состава рыбного

Таблица 3 / Table 3

Некоторые биологические показатели рыб р. Суран. Октябрь 2023 г. Район базы «Сенюк»
Some biological indicators of fish in the Suran River. October 2023. Senyuk camping area

Возраст Average age	Кол-во рыб Number of fish	Длина, мм min–max, mm <u>Length, mm</u> min–max, mm	Масса, г min–max, g <u>Weight, g</u> min–max, g	Доля половозрелых, % The proportion of sexually matured, %	Соотношение самцы:самки, % Male:Female ratio, %
<i>Esox lucius</i>					
3–6+ 4,2	20	290,7 ± 7,9 229–386	227,7 ± 21,7 101–555	30	35:65
<i>Rutilus rutilus</i>					
3–10+ 6,0	122	157,3 ± 2,2 116–219	79,8 ± 3,8 25–203	96,7	66:34
<i>Perca fluviatilis</i>					
4–7+ 5,4	9	142,3 ± 9,5 115–189	57,0 ± 13,1 27–124	55,6	67:33

населения) отмечено для р. Суран. Вторую позицию здесь занимает ёрш (менее четверти численного состава). Напротив, для верховьев р. Летки характерно наличие двух доминантов – уклейки и плотвы (около 40 %). Аналогичная картина наблюдается в отношении р. Мытец, однако здесь доминируют пескарь и ёрш. В последнем случае имеет место общее сходство роли в формировании состава рыбного населения практически всех выявленных здесь видов рыб, что мы связываем с их исключительно низкой численностью, сопровождающейся единичностью контрольных уловов.

Установлено, что на 15-километровом участке р. Мытец на территории национального парка «Койгородский» ряд видов рыб (щука, налим, ёрш) крайне редки, другие (в частности, язь, плотва и окунь) отсутствуют здесь как в период весеннего половодья, так и во время летней межени. При этом мелкие непромысловые виды (гольян обыкновенный, пескарь и голец усатый) остаются вполне обычными, хотя и немногочисленными.

Из всех водотоков парка наиболее детально изучено рыбное население р. Суран. При доминировании плотвы здесь обычны щука, уклейка, гольян и ёрш. Реже встречаются налим, язь, елец и окунь. Особое внимание обращают выявленная общая немногочисленность щуки на большем протяжении этой реки и практически полное отсутствие старшевозрастных особей данного вида.

Установлено, что при продвижении вверх по течению р. Суран количество обитающих здесь видов рыб заметно сокращается: в верховьях остаётся только три вида – плотва, щука и окунь. При этом доминирующая роль плотвы в составе местного рыбного населения (её доля не опускается ниже 50 %, достигая 80–90 %)

не зависит от периода проведения изысканий и района проведения исследовательских работ. Столь же стабильна, пусть и невысока, доля в формировании рыбной части водного сообщества окуня.

На участке р. Суран, примыкающем к туристической стоянке «Сенюк», для плотвы показаны наиболее высокие за пока ещё непродолжительный период исследований местного рыбного населения значения относительной численности (1,69 экз./ус. час). В верховьях этого водотока весьма высока плотность щуки (0,28 экз./ус. час), тем более для такой небольшой по размерам реки. Плотность окуня также относительно высока (0,13 экз./ус. час), особенно принимая во внимание, что он традиционно рассматривается как хищный вид.

В таблице 3 сведены основные биологические показатели рыб, населяющих участки русла р. Суран в районе туристической базы «Сенюк». В то время как большую часть населения плотвы составляют половозрелые рыбы, выборка щуки включает треть достигающих состояния половой зрелости особей.

Обращает внимание преобладание четырёх- и пятилетних особей щуки, а также полное отсутствие в уловах младшевозрастных групп плотвы, окуня и даже щуки. Кроме того, в питании щуки земноводные встречаются чаще, чем рыбная пища. Эти обстоятельства вкупе с высокой долей последней в составе рыбного населения верховий р. Суран и высокой численностью щуки могут расцениваться как один из первых результатов успешной уставной деятельности администрации и штата национального парка «Койгородский». Судя по всему, в ближайшие годы в воспроизводство вступят последние, более многочисленные поколения щуки, имеющие мощную

кормовую базу, формируемую той же плотвой. Здесь следует отметить, что до учреждения национального парка р. Суран служила базой для бесконтрольного потребительского лова рыбы, в первую очередь щуки.

На данном этапе исследований представляется преждевременным делать заключение, с чем связан столь ограниченный состав ихтиофауны водотоков национального парка «Койгородский», существенно отличающийся от выявленного на сопредельных участках рек Кобры и Летки около ста лет назад: слабой степенью ихтиофаунистической изученностью местных водотоков, или сокращением по естественным причинам количества и разнообразия местообитаний рыб в верховьях рек, локализованных непосредственно на территории национального парка. Не исключено, что большее количество видов будет обнаружено при проведении изысканий в разные сезоны года, а также при обследовании бассейна р. Фёдоровки.

Также не следует игнорировать сохраняющийся серьёзный пресс многочисленных рыбаков-любителей и браконьеров в отношении рыбного населения и охраняемых, и соседних участков рек парка, что закономерным образом сказывается на состоянии рыбных ресурсов многочисленных малых рек, образующих речную сеть национального парка «Койгородский». В этой связи нельзя недооценивать очевидные успехи мероприятий администрации и штата парка по охране экосистем и объектов парка, по всей видимости, сказавшиеся на начавшемся восстановлении популяции щуки в р. Суран.

Выводы

Впервые изучены состав ихтиофауны и структура рыбного населения основных водотоков национального парка «Койгородский». В составе ихтиофауны рек Мытец, Суран, Летка и руч. Сенюк в пределах территории парка и в непосредственной близости от неё зарегистрированы 11 видов: уклейка, пескарь, язь, плотва, елец, обыкновенный голянь, обыкновенная щука, налим, усатый голец, обыкновенный ёрш и речной окунь.

Рыбное население различных водотоков парка «Койгородский» имеет свою специфику. В р. Суран повсеместно доминирует плотва, заметно превышающая роль субдоминанта – ерша. Для верховьев р. Летки характерно наличие двух доминантов – уклейки и плотвы. На участках р. Мытец в пределах территории парка преобладает пескарь, а ёрш остаётся

субдоминантом. В верховьях руч. Сенюк рыбное население представлено единственным видом – обыкновенным голянём.

Получены данные о крайне низком ресурсном потенциале рыбного населения верховьев рек Мытец и Летка. Предполагается, что это связано как с естественными причинами (прежде всего величина водотоков и густота лесных завалов), так и хозяйственной деятельностью человека (лесозаготовки, перелов, браконьерство).

Установлено, что с продвижением к верховьям р. Суран сокращается количество входящих в структуру местного рыбного населения видов рыб. Отмечено появление в верховьях р. Суран весьма многочисленного поколения щуки, что можно связать с созданием национального парка и его успешной уставной деятельностью.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Закономерности формирования, пространственно-структурной организации и динамики фауны и населения животных европейского северо-востока России и сопредельных арктических и бореальных территорий в изменяющихся условиях окружающей среды» № 125013101229-9.

Литература

1. Degteva S.V., Ponomarev V.I., Eisenman S.W., Dushenkov V. Striking the balance: Challenges and perspectives for the protected areas network in northeastern European Russia // *Ambio*. 2015. V. 44. No. 6. P. 473–490. doi: 10.1007/s13280-015-0636-x
2. Дёгтева С.В., Пономарев В.И., Кудрявцева Д.И. Исторический очерк формирования сети особо охраняемых природных территорий в Республике Коми // *Вестник ИБ Коми НЦ УрО РАН*. 2020. № 3-4. С. 19–33. doi: 10.31140/j.vestnikib.2020.3-4(214).3
3. Лукаш Б.С. Рыбы бассейна реки Вятки выше гор. Слободского. Вятка: 1-я типо-литография, 1925. 50 с.
4. Дрягин П.А. Река Летка, её ихтиофауна и рыбный промысел // *Вятско-Ветлужский край*. 1927. № 5–6. С. 132–141.
5. Лоскутова О.А., Кочурова Т.И., Пономарев В.И., Шадрин Д.М. Первая находка *Eurylophella karelica* Tiensuu, 1935 (Ephemeroptera: Ephemerellidae) на северо-востоке европейской части России // *Кавказский энтомологический бюллетень*. 2024. Т. 20. № 2. С. 185–191. doi: 10.5281/zenodo.13933767
6. Лоскутова О.А., Кононова О.Н., Батурина М.А., Пономарев В.И. Зообентос и зоопланктон малых рек бассейна реки Кобры (национальный парк «Койгородский») // *Теоретическая и прикладная экология*. 2024. № 3. С. 210–216. doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-210-216

7. Ponomarev V.I. Features of the structure and nutrition of the fish population in mountain glacial lakes on the western slopes of the Urals // *Inland Water Biol.* 2024. V. 17. No. 6. P. 1054–1065. doi: 10.1134/S1995082924700664

8. Baturina M.A. Boznak E.I., Zakharov A.B. Monitoring of zoobenthos as the basis of the food supply for fish in the zone of the Middle Timan bauxite mine // *Water resources.* 2025. V. 52. No. 4. P. 124–135. doi: 10.31857/S03210596250410e7

9. Boznak E.I., Zakharov A.B. Dynamics of abundance and biological parameters of the European grayling *Thymallus thymallus* (Salmonidae: Thymallinae) of the Timan watercourse according to long-term observations // *J. Ichthyol.* 2025. V. 65. No. 2. P. 324–333. doi: 10.1134/S0032945224701108

10. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.

11. Ringnér M. What is principal component analysis? // *Nature Biotechnology.* 2008. V. 26. No. 3. P. 303–304. doi: 10.1038/nbt0308-303

12. Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P. PAST: Paleontological statistics software: Package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica.* 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4.

13. Жаков Л.А. Формирование и структура рыбного населения озёр Северо-Запада СССР. М.: Наука, 1984. 144 с.

14. Остроумов Н.А. Животный мир Коми АССР. Позвоночные. Сыктывкар: Коми госиздат, 1949. 240 с.

15. Соловкина Л.Н. Рыбные ресурсы Коми АССР. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1975. 168 с.

16. Остроумов Н.А. Животный мир Коми АССР. Позвоночные. Сыктывкар: Коми кн. изд-во, 1972. 280 с.

17. Красная книга Кировской области: животные, растения, грибы / 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.

18. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 288 с.

References

1. Degteva S.V., Ponomarev V.I., Eisenman S.W., Dushenkov V. Striking the balance: Challenges and perspectives for the protected areas network in northeastern European Russia // *Ambio.* 2015. V. 44. No. 6. P. 473–490. doi: 10.1007/s13280-015-0636-x

2. Degteva S.V., Ponomarev V.I., Kudryavtseva D.I. The history of the development of a network of nature protected areas in the Komi Republic // *Vestnik of Institute of biology of Komi scientific center of Ural branch of RAS.* 2020. No. 3-4. P. 19–33 (in Russian). doi: 10.31140/j.vestnikib.2020.3-4(214).3

3. Lukash B.S. Fishes of the Vyatka river basin above the town of Slobodskoy. Vyatka: Pervaya tipo-lithographiya, 1925. 50 p. (in Russian).

4. Dryagin P.A. The Letka River, its Ichthyofauna, and fishing industry // *Vyatsko-Vetluzhskiy Krai.* 1927. No. 5–6. P. 132–141 (in Russian).

5. Loskutova O.A., Kochurova T.I., Ponomarev V.I., Shadrin D.M. The first find of *Eurylophella karelica* Tiensuu, 1935 (Ephemeroptera: Ephemerellidae) in the northeast of the European part of Russia // *Caucasian Entomological Bulletin.* 2024. V. 20. No. 2. P. 185–191 (in Russian). doi: 10.5281/zenodo.13933767

6. Loskutova O.A., Kononova O.N., Baturina M.A., Ponomarev V.I. Zoobenthos and zooplankton in small rivers of the Kobra River basin (National Park “Koygorodsky”) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2024. No. 3. P. 210–216 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-210-216

7. Ponomarev V.I. Features of the structure and nutrition of the fish population in mountain glacial lakes on the western slopes of the Urals // *Inland Water Biol.* 2024. V. 17. No. 6. P. 1054–1065. doi: 10.1134/S1995082924700664

8. Baturina M.A. Boznak E.I., Zakharov A.B. Monitoring of zoobenthos as the basis of the food supply for fish in the zone of the Middle Timan bauxite mine // *Water resources.* 2025. V. 52. No. 4. P. 124–135. doi: 10.31857/S03210596250410e7

9. Boznak E.I., Zakharov A.B. Dynamics of abundance and biological parameters of the European grayling *Thymallus thymallus* (Salmonidae: Thymallinae) of the Timan watercourse according to long-term observations // *J. Ichthyol.* 2025. V. 65. No. 2. P. 324–333. doi: 10.1134/S0032945224701108

10. Pravdin I.F. Guide to fish study. Moskva: Pishchevaya promyshlennost', 1966. 376 p. (in Russian).

11. Ringnér M. What is principal component analysis? // *Nature Biotechnology.* 2008. V. 26. No. 3. P. 303–304. doi: 10.1038/nbt0308-303

12. Hammer Ø., Harper D., Ryan P. PAST: Paleontological statistics software: Package for education and data analysis // *Palaeontologia Electronica.* 2001. V. 4. No. 1. Article No. 4.

13. Zhakov L.A. Formation and structure of the fish population in the lakes of the North-West of the USSR. Moskva: Nauka, 1984. 144 p. (in Russian).

14. Ostroumov N.A. The animal world of the Komi ASSR. Vertebrates. Syktyvkar: Komi gosizdat, 1949. 240 p. (in Russian).

15. Solovkina L.N. Fish resources of the Komi ASSR. Syktyvkar: Komi knizhnoe izdatel'stvo, 1975. 168 p. (in Russian).

16. Ostroumov N.A. The animal world of the Komi ASSR. Vertebrates. Syktyvkar: Komi knizhnoe izdatel'stvo, 1972. 280 p. (in Russian).

17. The Red Data Book of the Kirov Oblast: animals, plants, and mushrooms / Eds. O.G. Baranova, E.P. Lachokha, V.M. Ryabov, V.N. Sotnikov, E.M. Tarasova, L.G. Tselishcheva. Kirov: Kirovskaya oblastnaya tipografiya, 2014. 336 p. (in Russian).

18. Pesenko Yu.A. Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies. Moskva: Nauka, 1982. 288 p. (in Russian).

Менделеевская экологическая экспедиция объединила молодых исследователей из 14 городов России

© 2026. Э. А. Крюкова, специалист отдела коммуникаций,
ФГУП «Федеральный экологический оператор»,
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 6,
e-mail: elvakryukova@rosfeo.ru

The Mendeleev Ecological Expedition brought together young researchers from 14 Russian cities

© 2026. E. A. Kryukova ^{ORCID: 0009-0003-2005-0603}
Federal Environmental Operator,
6, Pyzhevskiy Lane, Moscow, Russia, 119017,
e-mail: elvakryukova@rosfeo.ru

С 10 по 16 августа Нижегородская область приняла 6-ю Менделеевскую экологическую экспедицию. Данный проект реализуется госкорпорацией «Росатом» при содействии АНО «Энергия развития», сети информационных центров по атомной энергии (ИЦАЭ), ФГУП «ФЭО» и вузов Федерального научно-образовательного консорциума «Передовые ЭкоТехнологии». Более 80 участников из 14 городов России исследовали состояние водоёмов, работали в Керженском заповеднике, встречались с учёными и знакомились с современными научными и технологическими направлениями.

В 2026 г. в экспедицию отправились ученики проекта «Менделеевские классы» и их учителя, студенты и преподаватели региональных вузов-партнёров, а также победители Всероссийского конкурса «Большая перемена» в вызове «Сохраняй природу!».

Основой программы стали исследования водных объектов Нижегородской области. Пробы воды отбирали на р. Волге, р. Керженец, в г. Нижний Новгород и г. Бор, а также на озёрах Круглом и Ахтамоново в Керженском государственном природном заповеднике. Участники самостоятельно проводили измерения в полевых условиях и анализировали полученные образцы. Они определяли pH, температуру, минерализацию воды, содержание хлоридов, нитратов и фосфатов. По изученным показателям превышений предельно допустимых концентраций в отобранных пробах не выявили. Содержание хлоридов и значение pH во всех исследован-

ных водных объектах находилось в пределах нормативных значений.

Для школьников и студентов эта работа стала возможностью пройти основные этапы экологического исследования на реальных природных объектах. Участники экспедиции учились правильно отбирать пробы, работать с измерительным оборудованием, сопоставлять результаты и формулировать выводы. Для многих это был первый опыт полевых исследований с использованием различных методов экологического анализа.

Исследования за пределами лаборатории.

Все этапы научной работы сопровождали преподаватели и научные руководители профильных вузов. А полевой формат позволил участникам освоить экспресс-методы исследования воды, которые применяются непосредственно на природных объектах.

В Керженском государственном природном заповеднике участники прошли по экологической тропе «Пойма Керженца», познакомились с особенностями территории и подходами к сохранению природных экосистем. При исследовании воды участники смогли рассматривать водные объекты как часть единого механизма и увидеть, насколько состояние рек и озёр связано с окружающими территориями, растительностью и деятельностью человека.

Наука и технологии для решения экологических задач. Исследования водных объектов стали центральной, но не единственной частью программы. Участники посетили г. Саров и филиал МГУ имени М.В. Ломоносо-

ва, встретились с учёными и экспертами, а также пообщались с участниками Проектной школы МГУ и РФЯЦ-ВНИИЭФ. Одной из тем совместной работы стало применение физических методов в сфере обращения с отходами. Юные экологи сформулировали для участников Проектной школы практическую задачу по поиску способов автоматического распознавания компонентного состава потока смешанных отходов.

Знакомство с научной инфраструктурой г. Сарова позволило участникам увидеть, как фундаментальные знания применяются при решении практических задач. Для школьников это стало продолжением профориентационной программы и возможностью получить более полное представление о естественно-научных и технологических специальностях.

От исследования к собственным выводам. Завершением шестидневной работы стала защита командных исследовательских проектов. Участники представили результаты исследований, которые проводили на протяжении экспедиции. За несколько дней они прошли путь от постановки задачи и отбора проб до анализа полученных данных и подготовки собственных выводов.

Именно самостоятельная работа отличает формат проведения экспедиции от традиционных образовательных мероприятий. Участник получает не готовый ответ, а задачу, для решения которой необходимо применить знания, выбрать подходящий метод и оценить полученный результат.

Менделеевская экологическая экспедиция проводится с 2021 г. За это время её участники исследовали природу Байкала, Финского залива, Южного Урала, Камчатки и Мурманской области, знакомились с объектами накопленного вреда в окружающей среде, которые ликвидирует госкорпорация «Росатом», проводили лабораторные исследования и изучали современные подходы к обеспечению экологической безопасности.

В 2026 г. география проекта объединила участников экспедиции из городов: Саратов, Киров, Нижний Новгород, Ижевск, Иркутск, Усолье-Сибирское, Дзержинск, Новосибирск, Псков, Москва, Щучье, Камбарка, пгт Мирный и Михайловский. За шесть дней школьники, студенты и преподаватели из разных регионов стали одной командой. Для одних участие в экспедиции стало первым знакомством с таким форматом исследования экосистем, для других возможностью применить полученные знания на практике.

Таким образом, проект позволяет сформировать у молодых людей понимание современной экологической отрасли и помочь осознанно подойти к выбору дальнейшего образования. А исследовательский опыт, полученный ещё в школе и университете, становится основой для подготовки специалистов, которым в будущем предстоит работать с вопросами экологической безопасности и сохранения природных ресурсов страны.

Город Киров – ядро Кировской городской агломерации: направления развития

© 2026. В. Н. Симаков,
глава администрации г. Кирова,
610027, Россия, г. Киров, ул. Воровского, д. 39,
e-mail: inbox@admkirov.ru

The city of Kirov is the core of the Kirov urban agglomeration: development directions

© 2026. V. N. Simakov,
Head of Kirov city Administration,
39, Vorovskogo St., Kirov, Russia, 610027,
e-mail: inbox@admkirov.ru

Концепция пространственного развития городского округа определена Генеральным планом городского муниципального образования «Город Киров», утверждённым решением Кировской городской Думы от 18.12.2020 № 41/4, на расчётный срок – до 2040 г., которая базируется на трёх основных принципах развития:

- формирование центрально-городской системы, состоящей из транспортного каркаса и прилегающих общественных пространств;
- агломерационный: г. Киров как ядро Кировской агломерации;
- экологической безопасности: связан с развитием природно-рекреационного каркаса, с включением его основных элементов (природные территории, экологические коридоры, буферные территории) в центрально-городскую систему.

Законодательным Собранием Кировской области принят Закон Кировской области от 15.10.2024 № 310-ЗО «О создании и развитии агломераций в Кировской области». Основным стратегическим замыслом в развитии агломерации является эффективное использование потенциала городского округа, а также учёт агломерационного развития города в качестве промышленного, научного, культурного, экономического центра, крупного транспортного узла.

Площадь территории Городской агломерации составляет 6789,3 тыс. км² и включает г. Киров как ядро агломерации (с населением 500,9 тыс. человек); города спутники – г. Киров-Чепецк (63,9 тыс. человек), г. Слободской (28,2 тыс. человек), Кирово-Чепецкий

и Слободской муниципальные районы (52309 человек) (рис. 1, см. цв. вкладку VIII).

Формирование Городской агломерации опирается на сложившиеся социально-экономические и культурные связи территорий, которые исторически входили сначала в состав трёх уездов – Вятского, Слободского, Орловского – Вятской губернии, образованной в 1796 г., а затем сохранившие общие черты развития, тесное взаимодействие и многоотраслевые хозяйственные связи, схожие культурные традиции в составе Кировской области, образованной в 1936 г.

Концепция пространственного развития Городской агломерации основывается на двух принципах: учёт агломерационного развития и выявление внутреннего потенциала.

Основные направления развития Городской агломерации:

1. Агломерационное развитие: включает развитие территориальной системы расселения (улучшение транспортной связанности и уменьшение времени передвижения между основными центрами – Киров–Слободской–Кирово-Чепецк путём создания замкнутой кольцевой структуры).

2. Развитие городской среды (центрально-городской системы) предусматривает:

- создание связанной системы общественных пространств с включением природно-рекреационной оси – р. Вятки и «зелёного ядра» Заречного лесопарка – в структуру города, создание речного фасада города;
- усиление роли исторического центра города за счёт внесения г. Кирова в перечень

исторических поселений, имеющих особое значение для истории и культуры Кировской области, утверждения требований к градостроительным регламентам в границах поселений;

- улучшение связности районов города за счёт усиления роли меридиональных (ул. Ленина, Ивана Попова) и широтных транспортных направлений (ул. Московская, Воровского) и включения в градостроительное освоение экстенсивно используемых территорий;

- создание дополнительных городских подцентров, структурирование застраиваемых территорий восточной и западной пригородной зоны.

3. Реорганизация и развитие транспортной и инженерной инфраструктуры (рис. 2, см. цв. вкладку VIII):

- строительство автомобильного мостового перехода в створе ул. Азина в целях создания замкнутой кольцевой широтной структуры (ул. Азина – д. Богородская – ул. Профсоюзная);

- строительство западного обхода г. Кирова;

- развитие системы общественного транспорта;

- создание логистических центров на «вылетных» магистралях.

Важный элемент формирования рекреационного каркаса городской среды – это защита зелёных зон от застройки там, где они выполняют санитарные и климатические функции, а также развитие водных объектов и набережных при соблюдении природоохранных ограничений.

Рекреационный каркас г. Кирова представляет собой связанную систему парков, скверов, набережных, лесопарков, бульваров и зелёных коридоров, обеспечивающую отдых населения, здоровье горожан и экологическую устойчивость города.

Результат выражается в росте обеспеченности зелёными территориями, появлении связанных маршрутов отдыха и снижении перегрева и запылённости городских районов.

Формирование рекреационного каркаса предусматривает инвентаризацию существующих зелёных территорий и определение зон, подлежащих сохранению и взаимному связыванию, создание приоритетных маршрутов и пространств, где требуется благоустройство, освещение, безопасность, доступность для маломобильных граждан.

На начало 2026 г. администрацией г. Кирова принят ряд решений о комплексном развитии незастроенной территории и территории

жилой застройки. В прогнозный период ожидается увеличение жилищного строительства за счёт комплексного развития территорий, включая создание полноценных жилых районов с развитой инфраструктурой, социальной сферой и благоустроенной территорией. В долгосрочном периоде расширение реальных возможностей для развития города будет осуществляться за счёт более эффективного использования земли, повышения качества городской среды и снижения инфраструктурных ограничений.

Новые проекты должны сопровождаться созданием (или модернизацией) транспортных и инженерных сетей, объектов социальной инфраструктуры, а также общественных пространств.

Вовлечение земель в оборот под жилищное строительство через механизм комплексного развития территорий в г. Кирове позволяет системно осваивать неиспользуемые или неэффективно используемые участки, создавая современную городскую среду с развитой инженерной, транспортной и социальной инфраструктурой.

Комплексное развитие территорий рассматривается как основной инструмент формирования комфортной жилой застройки.

В состав основных мероприятий по формированию центра города, ядра агломерации входят:

- создание современных пространств для отдыха горожан и туристов (развитие парков и зон отдыха);

- реализация концепции благоустройства территории набережной р. Вятки (создание комфортной зоны отдыха и прогулочного маршрута, с учётом исторического контекста, берегоукрепление и вело-пешеходная связь вдоль р. Вятки);

- строительство дублёров магистральных улиц и перераспределение транспортных маршрутов, что позволит разгрузить центр города от транзитного потока (строительство проспекта Липатникова и объездной дороги г. Кирова);

- регулирование застройки в соответствии с градостроительными регламентами, установленными для исторического поселения (определение параметров разрешённого использования земельных участков, этажность зданий, отступы от границ участков и другие нормы, которые влияют на формирование облика центра города).

В результате реализации мероприятий по формированию центра города планируется достижение следующих ключевых итогов: со-

В. Н. Симаков «Город Киров – ядро Кировской городской агломерации: направления развития». С. 210.

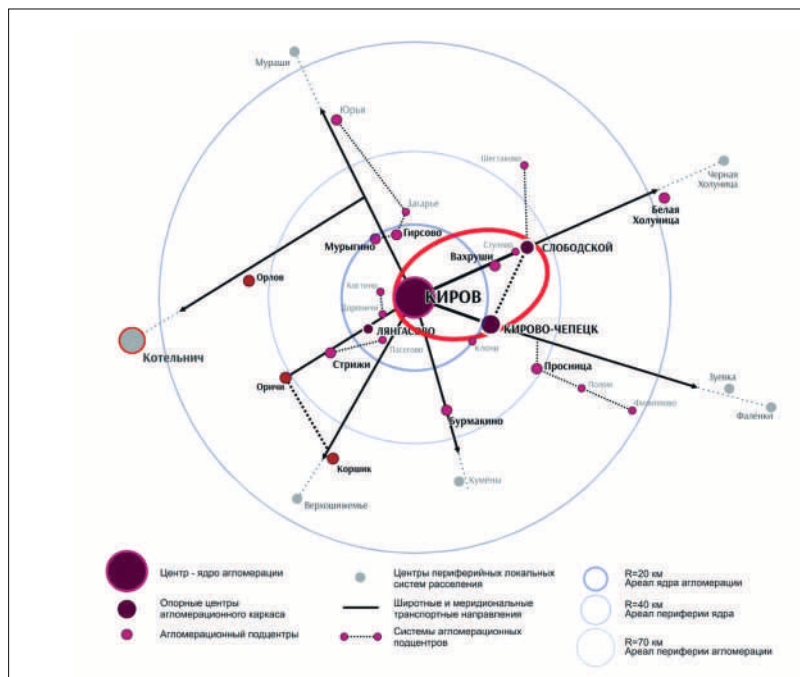


Рис. 1. Основные города агломерации
Fig. 1. The main cities of the agglomeration

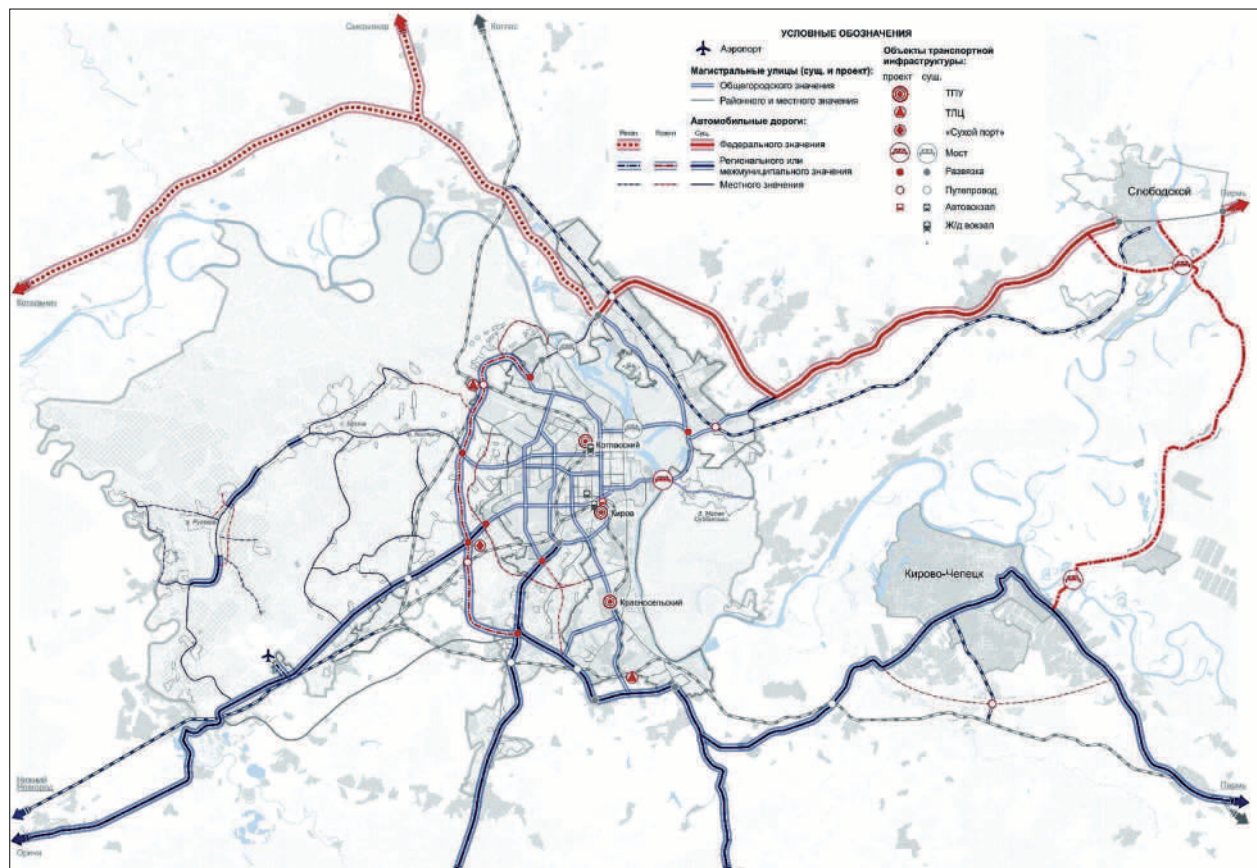


Рис. 2. Транспортный каркас ядра агломерации
Fig. 2. The transport framework of the agglomeration core

хранение историко-культурной идентичности, создание современных общественных пространств, развитие инфраструктуры, повышение инвестиционной и туристической привлекательности, улучшение качества жизни горожан.

Результатом реализации мероприятий по формированию рекреационного каркаса является:

1. Развитие существующих и создание новых парковых территорий:

- реконструкция и благоустройство действующих объектов (Александровский сад, парк имени Ю.А. Гагарина, Кочуровский парк);
- создание новых парковых зон и скверов в жилых микрорайонах.

2. Развитие туристско-рекреационных объектов:

- создание тематических парков и музейно-рекреационных пространств;
- обустройство экологических троп и маршрутов для пеших прогулок;
- интеграция объектов культурно-исторического наследия в рекреационный каркас;
- создание рекреационных объектов в сфере туризма в различных районах муниципального образования «Город Киров».

3. Благоустройство лесопарковых и природных территорий.

4. Экологическая реабилитация и озеленение:

- восстановление зелёных насаждений, газонов, цветников;
- посадка деревьев и кустарников с учётом климатических и эстетических требований;
- очистка и благоустройство водоёмов и прибрежных полос.

5. Создание и совершенствование нормативной базы:

- установление режимов охраны и использования природных и озеленённых территорий;
- согласование проектов комплексного развития территорий с обязательным включением рекреационных объектов.

Мероприятия по развитию инженерной инфраструктуры для повышения качества жизни граждан предусматривают строительство и модернизацию систем централизованного водоснабжения и водоотведения в муниципальном образовании «Город Киров». Реализация направлена на повышение качества жизни населения, увеличение надёжности

инженерной инфраструктуры, а также обеспечение комплексной безопасности, включая противопожарную.

Развитие водоснабжения и водоотведения выступает базовым условием для уплотнения застройки, повышения её этажности, реализации проектов индивидуального жилищного строительства. Без модернизации инженерных систем противопожарная безопасность становится критическим ограничением, а качество жизни недостижимым.

Реализация запланированных мероприятий и решение поставленных задач осуществляются через национальные, региональные проекты и государственные и муниципальные программы:

1. Национальный проект «Инфраструктура для жизни», включающий федеральные проекты: «Развитие инфраструктуры в населённых пунктах», «Жильё», «Модернизация коммунальной инфраструктуры», «Формирование комфортной городской среды», «Региональная и местная дорожная сеть», «Общесистемные меры развития дорожного хозяйства».

2. Региональный проект «Реализация проектов инициативного бюджетирования».

3. Государственные программы Кировской области «Инженерная и коммунальная инфраструктура», «Дорожно-транспортная система», «Пространственное развитие», «Строительство».

4. Муниципальная программа «Территориальное развитие муниципального образования «Город Киров».

В соответствии с Федеральным законом от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» предусмотрена необходимость сохранения, использования, популяризации и государственной охраны объектов культурного наследия.

Реализация данных проектов и программ позволит сохранить и развивать величие и историю г. Кирова, построить новые инфраструктурные объекты, улучшить транспортные магистрали, создать рекреационные объекты в сфере туризма, расширить зелёные насаждения, обустроить водоёмы, придомовые территории, цветники и газоны с целью улучшения качества жизни и обеспечения безопасности населения главного центра Кировской городской агломерации.

VI Менделеевская экологическая экспедиция



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004