



2024

*Теоретическая  
и прикладная*

**ЭКОЛОГИЯ**

ISSN 1995-4304 (PRINT)  
ISSN 2618-8406 (ONLINE)

**№ 4**

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**

**РЕМЕДАЦИЯ И  
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ**

**ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ**

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ  
ЭКОЛОГИЯ**

**ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ**

**СОЦИАЛЬНАЯ  
ЭКОЛОГИЯ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

<http://envjournal.ru>

# Реализация нацпроекта «Экология» на территории Кировской области»



*Т. Э. Абашев – министр,  
Министерство охраны  
окружающей среды  
Кировской области*

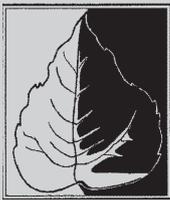
В рамках федерального проекта «Чистая страна» национального проекта «Экология» в регионе ведётся работа по созданию инфраструктуры сбора, сортировки, хранения и захоронения твёрдых коммунальных отходов (ТКО). Ликвидировано шесть свалок, расположенных в пгт Вахруши Слободского района, в г. Слободском, г. Омутнинске и две свалки в г. Малмыже. Завершаются работы по ликвидации самой крупной свалки в г. Кирове (пос. Костино), которая эксплуатировалась 47 лет, объём накопленных отходов более 3 млн м<sup>3</sup>, площадь земельного участка 27,7 га. Общая стоимость ликвидации шести свалок составила более 2,7 млрд руб., в том числе из федерального бюджета – 2,5 млрд руб. Таким образом, реализация федерального проекта «Чистая страна» на территории Кировской области до конца 2024 г. позволит повысить качество жизни порядка 590 тыс. человек и восстановить территории площадью более 50 га.

Регионом за счёт собственных средств ведётся работа по ликвидации поселковых свалок, количество которых составило 571 по инвентаризации 2012 г. По каждому объекту принято решение о его ликвидации путём вывоза или рекультивации на месте. По состоянию на 01.01.2024 ликвидировано 386 свалок из 538 подлежащих ликвидации, а к концу года запланировано ликвидировать ещё 5 свалок ТКО. На эти цели из областного и местного бюджетов выделено 25,9 млн руб. В 10 муниципалитетах работы по ликвидации свалок ТКО завершены в полном объёме.

В рамках федерального проекта «Комплексная система обращения с твёрдыми коммунальными отходами» национального проекта «Экология» в 2023–2025 гг. за счёт средств федерального бюджета в размере 971,74 млн руб. проводятся работы по проектированию и строительству комплексного объекта по обращению с ТКО

КПО «Центральный» в Слободском районе. В состав данного КПО войдёт мусоросортировочный завод мощностью 200 тыс. т ТКО/год и объект утилизации (компостирования) ТКО мощностью 60 тыс. т ТКО/год. В настоящее время проектная документация на строительство КПО «Центральный» проходит государственную экспертизу. Кроме данного объекта, за счёт средств областного бюджета в размере 62,3 млн руб. ведётся проектирование двух мусоросортировочных станций в Шабалинском районе и Лузском муниципальном округе и двух комплексных объектов по обращению с ТКО в Яранском и Вятскополянском районах. Проектная документация на их строительство разработана, получены положительные заключения государственной экспертизы. Мощность создаваемых объектов позволит направить на обработку до 85% всех образуемых в регионе отходов, и утилизировать не менее 25% из них.

В рамках развития системы обращения с ТКО создаются контейнерные площадки, которых создано к настоящему времени 3140. Работа по обновлению контейнерного парка продолжается. В 2024 г. региональным оператором АО «Куприт» передано в районы области 1530 пластиковых контейнеров для накопления ТКО. Увеличение количества контейнеров для раздельного сбора мусора и сортировка отходов крайне важны. При сортировке отхода получается не мусор, а вторичное сырьё для производства. Кроме того, такие отходы как батарейки, лампочки, градусники, лаки, шины, химикаты, попадая в окружающую среду, наносят ей непоправимый вред. Избежать этого может только осознанная сортировка и грамотная последующая утилизация – переработка или захоронение на полигоне. Залог успеха в решении данного важного мероприятия заключается в совместных действиях всего населения и специалистов по сбору отходов и их переработке.



# Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 4, 2024  
<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 (№ 2709 по состоянию на 09.12.2024).

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

Журнал издаётся с 2007 года.

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

**Главный редактор Т.Я. Ашихмина**,  
д.т.н., профессор, главный научный сотрудник  
Вятского государственного университета,  
зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Зам. главного редактора С.В. Дёгтева**,  
д.б.н., член-корр. РАН, профессор,  
директор ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

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

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

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

**Ответственный секретарь М.Л. Сазанова**,  
к.б.н., доцент, научный сотрудник  
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН

**Технические секретари:**

**Т.И. Кутявина**, к.б.н., старший научный сотрудник  
Вятского государственного университета,

**Е.А. Клековкина**, к.г.н., доцент  
Вятского государственного университета,

**В.В. Рутман**, младший научный сотрудник  
Вятского государственного университета

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

Статьи рецензируются. Перепечатка без разрешения редакции  
запрещена, ссылки на журнал при цитировании обязательны.

Редакция не несёт ответственности за достоверность  
информации, содержащейся в рекламных объявлениях.

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

Регистрационный номер и дата принятия решения  
о регистрации: серия ПИ № ФС77-74434 от 23 ноября 2018 г.

Подписной индекс ПС248 в каталоге «Подписные издания»  
официального каталога АО «Почта России».

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

Издательство: ООО «О-Краткое»

Адрес издательства: 610020, Кировская область, г. Киров, ул. Свободы, 67.

Оригинал-макет – Татьяна Коршунова, перевод – Григорий Кантор,

Мария Сазанова, фотография на 4-й обложке – Александр Широких,

администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман,

выпускающий редактор – Мария Зелаева.

Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов

© Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 23.12.2024.

Тираж 250 экз. Заказ № 4204. 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
- А. Гросс** д.х.н., профессор Орхусского университета (Дания)
- Е.В. Дабах** к.б.н., доцент, старший научный сотрудник  
ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- М.В. Дородников** к.с.-х.н., доцент, научный сотрудник  
Университета Гёттингена им. Георга Августа (Германия)
- М. Ж. Журинов** д.х.н., академик НАН Республики Казахстан,  
профессор, президент НАН РК, генеральный директор  
АО «ИТКЭ имени Д.В. Сокольского»
- Г.М. Зенова** д.б.н., профессор, профессор Московского государст-  
венного университета им. М.В. Ломоносова
- Г.Я. Кантор** к.т.н., научный сотрудник ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- Е.Ю. Колбовский** д.г.н., профессор, ведущий научный сотрудник Московского  
государственного университета им. М.В. Ломоносова
- Э.И. Коломиец** д.б.н., академик НАН Беларуси, профессор, директор  
Института микробиологии НАН Беларуси
- Л.В. Кондакова** д.б.н., профессор, профессор  
Вятского государственного университета
- В.П. Мешалкин** д.т.н., академик РАН, профессор, директор  
Международного института логистики  
ресурсосбережения и технологической инноватики  
(НОЦ) РХТУ им. Д.И. Менделеева
- А.В. Кучин** д.х.н., академик РАН, профессор, зав. отделом и зав.  
лабораторией Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.Н. Лажнецов** д.г.н., академик РАН, профессор, советник РАН
- В.З. Латыпова** д.х.н., член-корр. Академии наук Республики Татарстан, про-  
фессор, профессор Казанского федерального университета
- Ли Юй** д.б.н., иностранный член РАН (КНР), профессор, директор  
Института микологии Цзилиньского аграрного университета
- С.Г. Литвинец** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям  
Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государст-  
венного университета геодезии и картографии
- А.А. Москалёв** д.б.н., член-корр. РАН, профессор РАН,  
зав. лабораторией ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- С.В. Пестов** к.б.н., доцент, доцент Вятского государственного университета
- В.С. Петросян** д.х.н., профессор, зав. лабораторией Московского  
государственного университета
- С.А. Рубцова** д.х.н., с.н.с., директор  
Института химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН
- В.П. Савиных** д.т.н., академик РАН, профессор, президент Московского  
государственного университета геодезии и картографии
- Ф. Скапини** д.б.н., профессор Университета Флоренции (Италия)
- В.А. Сысуев** д.т.н., академик РАН, профессор, научный руководитель  
Федерального аграрного научного центра  
Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
- В.А. Терехова** д.б.н., доцент, профессор Московского государственного  
университета им. М.В. Ломоносова
- Е.И. Тихомирова** д.б.н., профессор, зав. кафедрой Саратовского  
государственного технического университета
- Т.А. Трифонова** д.б.н., профессор, профессор Московского  
государственного университета им. М.В. Ломоносова
- В.И. Холстов** д.х.н., профессор, руководитель центра ФГУП «ГосНИИОХТ»
- М.Х. Хусейн** д.б.н., профессор Университета Ассиут (Египет)
- В.В. Ширяев** д.б.н., с.н.с., в.н.с. ВНИИ охотничьего хозяйства  
и звероводства им. проф. Б.М. Житкова
- В.Т. Юнблюд** д.и.н., профессор, президент  
Вятского государственного университета

12+



# Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 4, 2024

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

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

The journal is published since 2007.

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

**Editor-in-Chief T.Ya. Ashikhmina,**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Executive Secretary M.L. Sazanova,**

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

**Technical Secretaries:**

**T.I. Kutyavina,** PhD in Biology,

Senior Researcher of Vyatka State University,

**E.A. Klekovkina,** PhD in Geography,

Associate Professor of Vyatka State University

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

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing. The editorial Board is not responsible for the accuracy of the information contained in advertisements.

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

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

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

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

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

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

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

Publisher: the publishing house of "O-Kratkoe".

Publisher's Address: 67 Svobody St., Kirov region, Russia, Kirov, 610000. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Grigoriy Kantor,

Mariya Sazanova. Photo on the 4st cover – Alexander Shirokikh. Admin-

istrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya

Zelayeva. Director of the publishing house "O-Kratkoe"

Evgeniy Drogov. © Publishing house "O-Kratkoe".

Release date: December 23, 2024.

Circulation 250 copies. Order No. 4204. 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
- A. Gross** Doctor in Chemistry, Professor of Aarhus University (Denmark)
- E.V. Dabakh** PhD in Biology, Associate Professor, Senior Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- M.V. Dorodnikov** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Professor of Georg August University of Göttingen (Germany)
- M.Zh. Zhurinov** Doctor in Chemistry, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Professor, President of NAS RK, General Director of "D.V. Sokolsky Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry"
- G.M. Zenova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- G.Ya. Kantor** PhD in Technical Sciences, Researcher of IB FRC Komi SC UB RAS
- E.Yu. Kolbovsky** Doctor in Geography, Leading Researcher, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Kolomiyets** Doctor in Biology, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Director of Institute of Microbiology, National Academy of Sciences of Belarus
- L.V. Kondakova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Vyatka State University
- V.P. Meshalkin** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Director of International Institute of Logistics Resource saving and technological Innovations of Mendeleev University of Chemical Technology
- A.V. Kuchin** Doctor in Chemistry, Academician of RAS, Professor, Head of Department and Head of Laboratory of Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.N. Lazhentsev** Doctor in Geography, Professor, RAS Advisor
- V.Z. Latypova** Doctor in Agriculture, Corresponding Member of Tatarstan Academy of Sciences, Professor, Professor of Kazan Federal University
- Li Yu** Doctor in Biology, Foreign Associate of RAS (China), Professor, Director of Mycology Institute of Jilin Agricultural University
- S.G. Litvinets** PhD in Agricultural Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Science and Innovation of Vyatka State University
- V.A. Malinnikov** Doctor in Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow State University of Geodesy and Cartography
- A.A. Moskalev** Doctor in Biology, Corresponding Member of RAS, Chief of the Laboratory of IB FRC Komi SC UB RAS
- S.V. Pestov** PhD in Biology, Associate Professor, Associate Professor of Vyatka State University
- V.S. Petrosyan** Doctor in Chemistry, Professor, Head of Laboratory of Moscow State University
- S.A. Rubtsova** Doctor in Chemistry, Senior Researcher, Director of the Institute of Chemistry FRC Komi SC UB RAS
- V.P. Savinykh** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, President of Moscow State University of Geodesy and Cartography, Pilot-Cosmonaut, twice Hero of the Soviet Union
- F. Scapini** Doctor in Biology, Professor of Florence University (Italy)
- V.A. Sysuev** Doctor in Technical Sciences, Academician of RAS, Professor, Scientific Director Federal Agricultural Research Center of North-East named N.V. Rudnitsky
- V.A. Terekhova** Doctor in Biology, Assistant Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- E.I. Tikhomirova** Doctor in Biology, Professor, Head of Department of Saratov State Technical University
- T.A. Trifonova** Doctor in Biology, Professor, Professor of Lomonosov Moscow State University
- V.I. Kholstov** Doctor in Chemistry, Professor, Head of the Center of the Federal State Unitary Enterprise "State Scientific Research Institute of Organic Chemistry and Technology"
- M.H. Hussein** Doctor in Biology, Professor of Assiut University (Egypt)
- V.V. Shiryayev** Doctor in Biology, Senior Researcher, Leading Researcher of All-Russian Research Institute of Hunting and Fur Breeding, prof. B.M. Zhitkov
- V.T. Yungblud** Doctor in History, Professor, President of Vyatka State University

# СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЗОРЫ

- Т. Я. Ашихмина, Т. А. Адамович, Е. В. Товстик* Потенциал биотических факторов в борьбе с распространением борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) (обзор) .....6
- Д. В. Петухов, Е. В. Товстик* Источники кадмия, анализ пределов содержания, стратегии снижения в окружающей среде (обзор) ..... 15
- М. Л. Сазанова, А. В. Сазанов, И. А. Жуйкова, Л. В. Тугаринов* Химический состав и сорбционная активность сапропелей (обзор) ... 26

## СТАТЬИ

- Б. В. Ермоленко, М. С. Прутских* Оценка энергетических, ресурсосберегающих, экологических, продуктовых и экономических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных ..... 37
- М. А. Шумилова, Ф. Ф. Чаусов, Д. К. Жиров, И. С. Казанцева, Н. Н. Пастухова, И. К. Аверкиев* Исследование возможности регенерационной утилизации отработанных электролитов меднения ... 49
- О. В. Сенько, Н. А. Степанов, О. В. Маслова, Е. Н. Ефременко* Антифунгальная защита строительных материалов производными гуминовых кислот в оценке АТФ-метрией .....56
- А. А. Абрамова, А. М. Батуева, Е. В. Грахова, М. Ю. Дягелев, В. Г. Исаков, А. М. Непогодин* Применение спектрофотометрического метода для обнаружения антибиотика цефотаксим в модельном растворе .....64
- А. В. Ялалетдинова, М. А. Малкова, Л. В. Еникеева, Е. А. Кантор* О возможности использования эмпирической функции распределения для количественной оценки вероятности превышения нормативов по цветности .....73
- О. Б. Наполов, А. П. Кулаков* Составление геоэкологической карты природоохранных мероприятий .....83
- О. Ю. Растегаев, Т. Я. Ашихмина, С. Н. Черников* Методы контроля и мониторинга фосфорорганических соединений в природных средах .....89
- А. Ю. Курбатов, Е. Д. Мурзина, М. А. Ветрова, Н. А. Иванцова* Обеспечение качества и безопасности процесса питьевой водоподготовки на примере р. Ганг .....96
- Т. Я. Ашихмина, Е. В. Дабах, Г. Я. Кантор, А. С. Тимонов, Е. А. Домнина, Т. И. Кутявина* Мониторинг подземных и поверхностных вод в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов .....105
- Т. И. Ширшова, К. Г. Уфимцев, И. В. Бешлей, А. Г. Донцов* Содержание биологически активных веществ в водных экстрактах продуктов деструкции кородревесных отходов .....115
- С. Л. Фукс, С. В. Девятерикова* Комплексная переработка отходов катализаторов в композиционные материалы .....122
- В. А. Бродский, С. В. Джима, Хейн Тху Аунг, А. Е. Лебедев, А. Р. Яворский, Н. М. Макарова* Очистка сточных вод и отработанных технологических растворов с повышенным содержанием от ионов металлов и органических соединений с использованием метода сорбции в реакторе .....129
- А. Е. Ефимов, А. Г. Бубнов, Г. И. Гусев, Г. Д. Овчинников* Перспективность технологии плазменнохимической очистки воздуха от формальдегида и муравьиной кислоты в промышленности .....138
- Е. В. Губарь, О. А. Самарина, О. В. Тупицына* Рациональное использование земельных ресурсов при размещении объектов захоронения твёрдых коммунальных отходов .....148
- Б. Ю. Тетерюк, А. А. Панюков, Е. М. Лаптева, Р. Р. Рафиков* Таксономическая структура флоры водоёмов, находящихся в зоне влияния лесопромышленного комплекса АО «СЛПК» (Республика Коми) .....158

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
МОДЕЛИ  
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ  
ПРИРОДНЫХ  
И АНТРОПОГЕННО  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ

ХИМИЯ ПРИРОДНЫХ  
СРЕД И ОБЪЕКТОВ

ЭКОЛОГИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

<b>ЭКОЛОГИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА</b>	<i>X. H. Li, Y. Chen</i> Detection of trace cyanide in water by isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone polarography ..... 168
<b>РЕМЕДИАЦИЯ И РЕКУЛЬТИ- ВАЦИЯ</b>	<i>Е. Н. Терёбова, Н. В. Орешникова, М. А. Павлова</i> Фиторекультивация техногенных ландшафтов с использованием растений рода <i>Salix</i> L. .... 175
<b>ЭКОТОКСИ- КОЛОГИЯ</b>	<i>Н. В. Зайцева, М. А. Землянова, А. М. Игнатова, Ю. В. Кольди- бекова, М. С. Степанков</i> Признаки хронического воздействия повышенных концентраций РМ <sub>2,5</sub> и РМ <sub>10</sub> на параметры эритроцитов у детей ..... 184
<b>ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ</b>	<i>К. В. Мячина, Р. В. Ряхов, А. Н. Щавелев, Р. М. Безбородникова, С. А. Дубровская</i> Анализ закономерностей поглощения углерода горно-лесными, горно-степными и степными ландшафтами России на основе спутниковых данных и метеорологических наблюдений ..... 192 <i>А. В. Манов, А. Ф. Осипов, С. В. Загирова</i> Современное состояние древесного яруса среднетаёжных хвойных и лиственных насаждений (на примере тестового полигона «Ляльский», Республика Коми) ..... 201
<b>СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ</b>	<i>В. М. Караулов, Л. В. Караулова, В. Н. Пугач, Е. В. Каранина</i> Экологическая эффективность экономики как основа устойчивого развития региона ..... 211 <i>О. V. Baykova, V. N. Pugach, A. V. Kazakov</i> Food waste and its valorization into value-added products (case-study of the international experience of Asian countries) ..... 225
<b>ХРОНИКА</b>	<i>Н. О. Ковалева</i> X Съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева .... 235 <i>Е. М. Тарасова</i> Всероссийская научно-практическая конференция «Научные исследования как основа охраны природных комплексов заповедника «Нургуш» ..... 237 <i>Т. Я. Ашихмина, М. Л. Сазанова</i> VI Всероссийский научно- практический форум «Утилизация отходов производства и потреб- ления: инновационные подходы и технологии»: итоги работы ..... 239 <i>Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина</i> Реализация научно-исследова- тельского потенциала молодёжи в конкурсной деятельности ..... 241

## CONTENTS

### REVIEWS

<b>THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY</b>	<i>T. Ya. Ashikhmina, T. A. Adamovich, E. V. Tovstik</i> Biotic factors' poten- tial in controlling the spread of <i>Heracleum sosnowsky</i> Manden. (review) ..... 6 <i>D. V. Petukhov, E. V. Tovstik</i> Cadmium sources, limit analysis, environmental mitigation strategy (review) ..... 15 <i>M. L. Sazanova, A. V. Sazanov, I. A. Zhukova, L. V. Tugarinov</i> Chemical composition and sorption activity of sapropels: a review ..... 26
--	--

### ARTICLES

<b>METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS</b>	<i>B. V. Ermolenko, M. S. Prutskikh</i> Assessment of energy, resource saving, environmental, product and economic potential of farm animal products .... 37 <i>M. A. Shumilova, F. F. Chausov, D. K. Zhiron, I. S. Kazantseva, N. N. Pastukhova, I. K. Averkiev</i> Study of the possibility of regenerative recycling of waste copper plating electrolytes ..... 49 <i>O. V. Senko, N. A. Stepanov, O. V. Maslova, E. N. Efremenko</i> Antifungal protection of building materials by humic acid derivatives as assessed by ATP-metry ..... 56 <i>A. A. Abramov, A. M. Batueva, E. V. Grachova, M. Yu. Dyagelev, V. G. Isakov, A. M. Nepogodin</i> Application of spectrophotometric method for antibiotic Cefotaxime detection in a model solution ..... 64 <i>A. V. Yalaletdinova, M. A. Malkova, L. V. Enikeeva, E. A. Kantor</i> On the possibility of using the empirical distribution function to quantify the probability of exceeding the water color standards ..... 73 <i>O. B. Napolov, A. P. Kulakov</i> Drawing up a geo-ecological map of environmental protection measures ..... 83
---	---

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

**CHEMISTRY  
OF NATURAL  
ENVIRONMENTS  
AND OBJECTS**

**ECOLOGIZATION  
OF PRODUCTION**

**REMEDICATION  
AND RECULTIVATION**

**ECOTOXICOLOGY**

**ECOLOGY AND  
CLIMATE CHANGE**

**SOCIAL ECOLOGY**

**CHRONICLE**

<i>O. Y. Rastegaev, T. Ya. Ashikhmina, S. N. Chernikov</i> Methods of control and monitoring of organophosphorus compounds in natural environments .....89
<i>A. Yu. Kurbatov, E. D. Murzina, M. A. Vetrova, N. A. Ivantsova</i> Ensuring quality and safety for the process of drinking water treatment: case-study of the Ganges River ..... 96
<i>T. Ya. Ashikhmina, E. V. Dabakh, G. Ya. Kantor, A. S. Timonov, E. A. Domnina, T. I. Kutjavina</i> Monitoring of ground and surface water in the area of hazardous industrial waste disposal enterprises ..... 105
<i>T. I. Shirshova, K. G. Ufimtsev, I. V. Beshley, A. G. Dontsov</i> Content of biologically active substances in aqueous extracts of bark-wood waste degradation products .....115
<i>S. L. Fuchs, S. V. Devyaterikova</i> Integrated recycling of catalyst waste into composite materials .....122
<i>V. A. Brodskiy, S. W. Jima, Hein Thu Aung, A. E. Lebedev, A. R. Yavorskiy, N. M. Makarova</i> Wastewater and waste technological solutions with high salt content treatment from metal ions and organic compounds by the sorption method in the reactor .....129
<i>A. E. Efimov, A. G. Bubnov, G. I. Gusev, G. D. Ovchinnikov</i> Technology prospects for plasma-chemical air purification from formaldehyde and formic acid in industry .....138
<i>E. V. Gubar, O. A. Samarina, O. V. Tupicina</i> Rational use of land resources in the placement of municipal solid waste disposal facilities .....148
<i>B. Yu. Teteryuk, A. A. Panyukov, E. M. Lapteva, R. R. Rafikov</i> Taxonomic structure of the flora of water bodies located in the zone of influence of the JSC “SLPC” (Komi Republic) .....158
<i>X. H. Li, Y. Chen</i> Detection of trace cyanide in water by isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone polarography ....168
<i>E. N. Terebova, N. V. Oreshnikova, M. A. Pavlova</i> Phytoremediation of technogenic landscapes using plants of the genus <i>Salix</i> L. ....175
<i>N. V. Zaitseva, M. A. Zemlianova, A. M. Ignatova, Yu. V. Koldibekova, M. S. Stepankov, E. V. Peskova</i> Indicators of chronic exposure to elevated concentrations of PM2.5 and PM10 on the parameters of children’s red blood cells .....184
<i>K. V. Myachina, R. V. Ryakhov, A. N. Shchhavelev, R. M. Bezborodnikova, S. A. Dubrovskaya</i> Analysis of the carbon sequestration patterns by mountain-forest, mountain-steppe and steppe landscapes of Russia based on satellite data and meteorological observations .....192
<i>A. V. Manov, A. F. Osipov, S. V. Zagirova</i> Current state of the tree layer of middle taiga coniferous and deciduous forests (case-study of the test site “Lyalsky”, Komi Republic) .....201
<i>V. M. Karaulov, L. V. Karaulova, V. N. Pugach, E. V. Karanina</i> Eco-efficiency as the basis for sustainability development of the region .....211
<i>O. V. Baykova, V. N. Pugach, A. V. Kazakov</i> Food waste and its valorization into value-added products (case-study of the international experience of Asian countries) .....225
<i>N. O. Kovaleva</i> IX Congress of the V.V. Dokuchaev Soil Science Society .....235
<i>E. M. Tarasova</i> All-Russian scientific and practical conference “Scientific research as a basis for protecting natural complexes of the Nurgush Nature Reserve” .....237
<i>T. Ya. Ashikhmina, M. L. Sazanova</i> Results of the VI All-Russian scientific and practical forum “Production and consumption waste utilization: Innovative approaches and technologies” .....239
<i>N. V. Syrchina, T. Ya. Ashikhmina</i> Realization of research potential of young people in science competition .....241

## Потенциал биотических факторов в борьбе с распространением борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) (обзор)

© 2024. Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,  
Т. А. Адамович<sup>1</sup>, к. г. н., доцент,  
Е. В. Товстик<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, с. н. с.,  
<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: usr08619@vyatsu.ru

В данном обзоре рассмотрены естественные вредители, конкуренты борщевика Сосновского. Отдельное внимание уделено роли мутуализма в инвазивности борщевика. Существенно повреждают борщевик Сосновского вирус жёлтой пятнистости пастернака, личинки долгоносика-стеблееда (*Lixus iridis* (Olivier, 1807)), мухи-агромизиды (*Phytomyza pastinacae* (Hendel, 1923)), зонтичной моли (*Epermenia chaerophyllella* (Goeze, 1783)), совки (*Dasypolia temple* (Thunberg, 1792)), депрессарииды (*Depressaria radiella* (Goeze, 1783)), сельдерейной мухи (*Euleia heraclei* (Linnaeus, 1758)), пластинчатоусых жуков (*Oxythyrea funesta* (Poda, 1761)), гусеницы Махаона камчатского (*Papilio machaon* (Linnaeus, 1758)). Питаются соком борщевика – трипсы (*Thrips vulgatissimus* (Haliday, 1836)), листьями и стеблями – фрачник обыкновенный (*Lixus iridis*). К фитопатогенным грибам, повреждающим борщевик Сосновского, относят *Phoma complanata* ((Tode) (= *Calophoma complanata*)). Наиболее часто у борщевика при поражении грибами отмечают мучнистую росу, аскохитоз и цилиндроспороз. Отмечается роль разведения моллюсков и выпаса домашнего скота в сдерживании распространения борщевика. В связи с отсутствием конкуренции в окружающей среде обсуждается важность её искусственного создания. Рассмотрены примеры быстрорастущих многолетних трав, создающих плотную дернину, не дающую семенам борщевика прорасти. Среди них мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.), овсяница красная (*Festuca rubra* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.), топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.), козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.). На пустырях и заброшенных землях конкуренцию могут составить замещающие культуры – ель (*Picea abies* (L.) Karst.), сосна (*Pinus sylvestris* L.). Успех интродукции популяций борщевика зависит от наличия опылителей, распространения его семян животными и человеком; симбиоза с грибами и бактериями. Обсуждается возможность ограничения распространения борщевика посредством исключения видов, которые улучшают его приспособляемость. Сделано заключение о перспективности использования и необходимости дополнительных исследований биологических агентов контроля для снижения численности борщевика Сосновского и исключения негативных последствий для окружающей среды.

**Ключевые слова:** агенты биологического контроля, вирусы, насекомые, фитопатогенные грибы, конкуренция, многолетние травы, замещающие культуры.

## Biotic factors' potential in controlling the spread of *Heracleum sosnowskyi* Manden. (review)

© 2024. T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047  
T. A. Adamovich<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8684-927X  
E. V. Tovstik<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1861-6076  
<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: usr08619@vyatsu.ru

This review examines natural pests, competitors of the *Heracleum sosnowskyi*. Special attention is paid to the role of mutualism in the invasiveness of hogweed. the parsnip yellow spot virus, larvae of the weevil (*Lixus iridis* (Olivier, 1807)), agromyzid flies (*Phytomyza pastinacae* (Hendel, 1923)), umbrella moth (*Epermenia chaerophylllella* (Goeze, 1783)), scoops (*Dasypolia temple* (Thunberg, 1792)), depressariids (*Depressaria radiella* (Goeze, 1783)), celery fly (*Euleia heraclei* (Linnaeus, 1758)), lamellate beetles (*Oxythyrea funesta* (Poda, 1761)), caterpillars of the Kamchatka Swallowtail (*Papilio machaon* (Linnaeus, 1758)) significantly damaged *Heracleum sosnowskyi*. *Thrips vulgatissimus* (Haldiday, 1836) feeds on the sap, while *Lixus iridis* eat leaves and stems of the above mentioned hogweed. *Phoma complanate* (Tode) (= *Calophoma complanate*) is a phytopathogenic fungi that damage *Heracleum sosnowskyi*. Powdery mildew, ascochitosis and cylindrosporosis are most common fungal diseases of the giant hogweed. Shellfish farming and livestock grazing curb the spread of hogweed. Due to the lack of competition in the environment, the importance of its artificial creation is discussed. The fast-growing perennial grasses create dense turf that prevents germinating of hogweed seeds. *Poa pratensis* L., *Alopecurus pratensis* L., *Bromus inermis* Leyss., *Festuca rubra* L., *Phlum pratense* L., *Lolium perenne* L., *Helianthus tuberosus* L., and *Galega orientalis* Lam. are among them. Replacement crops, such as *Picea abies* (L.) Karst. and *Pinus sylvestris* L., can compete in vacant lots and abandoned lands. The success of the hogweed populations introduction depends on the presence of pollinators, the spread of its seeds by animals and humans; symbiosis with fungi and bacteria. The possibility of limiting the spread of hogweed through the absence of species that improve its adaptability is discussed. It was concluded that biological control agents are promising to use and additional studies is needed to reduce the number of *Heracleum sosnowskyi* and eliminate negative consequences for the environment.

**Keywords:** biological control agents, viruses, insects, phytopathogenic fungi, competition, perennial grasses, replacement crops.

Борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) является причиной одной из самых проблемных инвазий в мире [1]. На территории Российской Федерации (РФ) это агрессивное растение в настоящее время распространяется быстро. Согласно подсчётам, в 31 субъекте РФ борщевик может занять более 50%, а в 7 – порядка 80% территории. Катастрофическая опасность складывается в пяти, очень высокая – в десяти, высокая – в четырёх регионах, включая Кировскую область [2].

Чужеродный для экосистем борщевик Сосновского представляет серьёзную угрозу для биоразнообразия местной флоры и фауны [3, 4]. Активно внедряясь в естественные местообитания и нарушая сукцессионные связи, он изменяет аборигенные экосистемы [5–8].

Для предотвращения распространения борщевика Сосновского разрабатываются различные стратегии. Согласно данным работы [9], в период с 2011 по 2017 г. в РФ исполнены не менее 477 контрактов по ликвидации зарослей инвазионного вида *H. sosnowskyi* на общую сумму 314 млн руб. В Кировской области с 2023 г. борьба с борщевиком, включающая химическую и механическую обработку, проводится в рамках реализации государственной программы развития агропромышленного комплекса региона. На эти цели из областного бюджета в последние годы выделяется порядка 32 млн руб. [10]. Однако ввиду нерешённости проблемы, актуальна разработка стратегий борьбы с борщевиком, в том числе опирающихся на потенциал биотических факторов [11].

Известно, что биотические взаимодействия между инвазивными и аборигенными

видами всех таксономических групп являются важнейшими посредниками динамики инвазий растений [12]. Обычно успех интродуцированных популяций зависит от взаимодействия растений с врагами, конкурентами и мутуалистами [13]. Внедрение естественных врагов (вирусов, бактерий, грибов, насекомых и т.п.) в качестве средств биологического контроля является экологически безопасным, рентабельным и устойчивым подходом к борьбе с инвазивными видами [14]. В то же время отсутствие вида, который негативно влияет на приспособляемость организма к факторам среды, также может ограничить процветание интродуцированной популяции в новом ареале [15].

Цель работы – систематизация информации о биотических факторах, оказывающих влияние на жизнеспособность борщевика Сосновского.

### Объекты и методы исследования

Научные публикации для систематического обзора были отобраны путём запроса в научную электронную библиотеку e-library.ru, КиберЛенинка, поисковую систему по научным публикациям Академия Google. Поиск патентов проводили в Информационно-поисковой системе Федерального института промышленной собственности. Для систематизации информации использовали литературные источники, не ограниченные периодом исследования. В настоящем обзоре критерием отбора источников для систематизации информации служили ключевые слова «борщевик Сосновского», «внутривидовая и межвидовая

конкуренция», «биотические факторы», «консортивные связи».

### Естественные враги борщевика Сосновского

Данные о потенциале естественных врагов борщевика Сосновского в качестве агентов биоконтроля достаточно ограничены.

Известно множество неклеточных организмов, поражающих дикорастущие растения, но в сообществах диких растений вирусные эпидемии обычно менее очевидны и менее распространены, чем у культурных растений [16]. Имеются отдельные сведения о встречаемости вирусов на некоторых видах *Heracleum sphondylium* L. Среди них вирус жёлтой пятнистости пастернака, переносимый тлей и поражающий зонтичные растения [17].

В качестве агентов биологического контроля определённую перспективу имеют фитофаги, обитающие во вторичном ареале борщевика Сосновского и оказывающие влияние на его вегетативное и генеративное развитие. Однако борщевик Сосновского в меньшей степени, чем другие растения семейства Umbelliferae, повреждается фитофагами [18]. Из 32 видов насекомых, собранных на борщевиках в Московской области, было выделено 5 фитофагов, наносящих вред этим растениям [19]. Среди них долгоносик-стеблеед *Lixus iridis* (Olivier, 1807) (Coleoptera). Этот вид распространён по всей территории европейской части страны [20, 21]. Установлено, что личинки данных жуков выгрызают богатые запасными питательными веществами ткани внутри стеблей борщевика. Чаще всего личинки *L. iridis* обнаруживаются в стеблях борщевика в нижней и средней части; при этом в маленьких экземплярах растений личинки встречаются чаще, чем в крупных [22].

К естественным врагам борщевика относятся личинки мухи-агрозиды *Phytomyza pastinacae* (Hendel, 1923) (Diptera). В ходе наблюдений, проведённых в условиях Московской области, выявлено, что вид имеет два поколения. Личинки мухи появляются в листьях борщевика в июне, лёт мух происходит в конце июля – августе, второе поколение личинок заканчивает развиваться в сентябре. Окукливание происходит в подстилке. Вылет имаго второго поколения происходит в октябре [23].

К насекомым, поражающим борщевик, относят гусениц зонтичной моли *Epermenia chaerophyllella* (Goeze, 1783) (Lepidoptera).

Они минируют листья, окукливаются под эпидермисом, нанося ощутимый вред растению [19].

К насекомым, поражающим борщевик, относят личинки буровницы борщевичной или сельдерейной мухи (*Euleia heraclei* (Linnaeus, 1758)). Наблюдения, проведённые в условиях Московской области, позволили установить, что весной личинки *E. heraclei* повреждают листья дикорастущих и культурных зонтичных растений двухлетнего возраста, в конце лета и осенью – листья годовалых растений. Серьёзный вред (от 30 до 70% поражённых листьев), наносимый личинками *E. heraclei* молодым растениям борщевика Сосновского, отмечается осенью [24]. Минирующие ходы личинки, а иногда и её саму, можно заметить внутри листьев борщевика в виде светлых пятен или линий на просвет солнечными лучами. Однако стоит отметить, что личинки этого фитофага активно повреждают не только листья борщевика, но и листья пастернака, сельдерея и других зонтичных культур [25], что необходимо учитывать при выборе *E. heraclei* в качестве агента биологического контроля.

К насекомым, выгрызающим завязи борщевика Сосновского, относят пластинчатоусых жуков (*Oxythyrea funesta* (Poda, 1761)). Однако этот полифаг наносит вред не только борщевика, но и яблоням, а также шиповнику. Вид отмечен также на дуднике лесном и одуванчике [19].

В качестве корма борщевик Сосновского используют гусеницы Махаона камчатского (*Papilio machaon* (Linnaeus, 1758)) [26, 27]. Их выживаемость при питании на борщевике составляет 35%, тогда как на других зонтичных гусеница в природе может не закончить цикл своего развития [28].

Борщевик является основным кормовым растением для *Depressaria radiella* (Goeze, 1783) в зоне средней тайги (Республика Коми) [19]. Данный вид тлей встречается в основном на пустырях и опушках лесов (на 20–40% растений) и не отмечен в зоне городской застройки и вдоль автомобильных дорог. Максимальная повреждаемость соцветий *H. sosnowskyi* имаго может достигать 30%. На борщевике Сосновского гусеницы этого вида отмечены в первой декаде июля и встречаются до середины августа. Кроме этого, на борщевике Сосновского встречаются колонии тлей, численность которых может достигать от 1 до 5 тыс. особей. Соцветия *H. sosnowskyi* в результате повреждения тлей могут засыхать и практически не формировать семян.

*Thrips vulgatissimus* (Haliday, 1836) (Thysanoptera, Thripidae) широко распространён в Евразии, Северной Америке, в России отмечен на цветках и цветоножках борщевика Сосновского (до 20–100 особей на одном цветонесе). Данный вид встречается вместе с тлями. *Thrips vulgatissimus* питается соком борщевика и оставляет повреждения на листьях. Первые повреждения на листьях борщевика в условиях Республики Коми отмечаются в начале августа, когда устанавливается прохладная и сырая погода. К концу августа повреждённость листьев достигает в отдельных случаях до 90% [29, 30].

Использование фитопатогенных грибов как агентов биологического контроля может являться одним из альтернативных способов борьбы с борщевиком Сосновского. Кроме того, отмечается возможность применения для борьбы с борщевиком препаратов на основе микроскопических грибов совместно с синтетическими гербицидами [31].

В настоящее время выделены штаммы грибов, обладающие микогербицидной активностью и перспективные в борьбе с борщевиком Сосновского. Среди них штамм гриба *Phoma complanata* (Tode) Desm. 1.40 (ВИЗР) (= *Calophoma complanata*). Данный штамм проявляет высокую патогенность в отношении борщевика Сосновского. В лабораторных условиях обработка растений споровой суспензией штамма позволила достичь интенсивности развития заболевания более чем 45%, а при обработке мицелиальной суспензией – более 60%. В полевых условиях обработка растений мицелиальной суспензией штамма приводила к 40% поражению растений [32]. Установлено, что мицелий *Calophoma complanata* поражал розеточные листья растений первого года и листья растений в генеративной фазе развития, отмечена большая восприимчивость листьев растений первого года. При изучении инфекционного процесса обнаружено, что конидии могут прорасти на поверхности листьев, но не способны проникать в ткани растения. При заражении листьев мицелием проникновение гиф происходит через устьица или стыки эпидермальных клеток [33].

В рамках разработки биологического метода борьбы на территории Ленинградской области выявлено 27 видов микроскопических грибов, поражающих растения рода *Heracleum*, в том числе и борщевик Сосновского.

Наиболее распространёнными болезнями борщевика Сосновского в Ленинградской области являются мучнистая роса (повреждает

до 20% листьев), аскохитоз (нарушает нормальное развитие растения) и цилиндроспороз (поражает до 35% листьев) [34].

В ходе полевых обследований, проведённых на территории Тверской области, были выявлены повреждения у растений борщевика несколькими видами брюхоногих моллюсков. Особенно сильные – отверстия на листьях – были сделаны сетчатым слизнем (*Agriolimax reticulatus* Müll) [35].

Следует отметить, что данный вид моллюсков поедает не только листья борщевика, но и прорастающие семена, молодые побеги, листья, плоды, всходы овощных, зерновых, технических культур и многолетних трав [36]. В связи с этим, при рассмотрении моллюсков в качестве агентов биологического контроля, необходимо также контролировать их численность. Например, первоначально возможен сбор улиток и «икры» моллюсков-аборигенов, переселённых на борщевик. На перспективу реально организовать фермы вблизи борщевика и пастбища для выращивания «стандартных улиток», которые уже признаны деликатесом.

Одним из методов сдерживания распространения борщевика может являться выпас домашнего скота (коровы, козы, овцы). Преимуществом этого метода является то, что он не наносит вреда окружающей среде. Кроме того, он может помочь в сохранении здоровья животных и обеспечении дополнительного источника пищи [37–39]. В сыром виде зелёную массу борщевика после её скашивания подают все животные, кроме лошадей. Зелёная масса его содержит 19–23% сахаров в расчёте на абсолютно сухое вещество. Борщевик хорошо силосуются. Силос имеет хорошие кормовые достоинства, у него приятный запах квашеных овощей, хороший вкус и оптимальное соотношение органических кислот [40]. Однако, в результате его использования у молока и мяса появляется неприятный горький привкус и специфический запах. Кроме того, борщевик оказывает негативное воздействие на репродуктивную систему животных. По этим причинам со временем аграрные комплексы перестали использовать силос, приготовленный из данного растения. Выпас крупного рогатого молочного скота на пастбищах с участием борщевика вызывает поражение открытых участков покровных тканей: вымени и головы [41]. При выпасе скота на участках с зарастанием борщевика отмечается растрескивание капилляров и слабое кровотечение, что приводит к изменению окраски молока от

снежно-белого у здоровых коров до светло-розового цвета у животных с поражёнными участками вымени.

### Конкуренты борщевика Сосновского

Согласно ретроспективному анализу спутниковых изображений ежегодный рост площадей зарослей борщевиков в экспоненциальной фазе роста численности ценопопуляции может достигать 20% [42]. Основная причина заключается в отсутствии конкуренции с другими видами в окружающей среде. В связи с этим целесообразно искусственно создавать конкуренцию.

Естественными конкурентами для борщевика Сосновского могут быть быстрорастущие многолетние травы, создающие плотную дернину, не дающую семенам борщевика прорасти [43]. В качестве задерживающих трав-доминантов, после предварительной вспашки рекомендуется использовать мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.), овсяницу красную (*Festuca rubra* L.) [44], тимофеевку луговую (*Phleum pratense* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.) с нормой высева семян 150 кг/га. Сеяные многолетние травы препятствуют проникновению света к прорастающим растениям борщевика и являются конкурентами борщевика в поглощении из почвы влаги и питательных веществ, а скашивание фитоценозов с содержанием в нём этого злостного сорняка предотвращает его обсеменение [45]. Данные культуры обладают значимыми сельскохозяйственными свойствами, а также характеристиками, благодаря которым при обеспечении должного технологического ухода со стороны человека потенциально могут подавлять произрастание растений борщевика Сосновского [46].

Известным конкурентом борщевика является топинамбур (*Helianthus tuberosus* L.). Эта многолетнее травянистое растение – одна из самых высокоурожайных культур в мире: до 200 т/га зелёной массы и 150 т/га клубней [47]. За счёт больших листьев и высоты ствола, достигающей до 2–4 м, растения топинамбура способны перекрывать солнечный свет борщевика, не давая ему разрастаться. Неприхотливость топинамбура позволяет ему успешно произрастать на всех типах почв, за исключением сильнокислых и заболоченных. Ни в одной зоне возделывания у топинамбура пока нет вредителей [48]. Однако, как и борщевик,

топинамбур является инвазивным видом, который вне пределов культивирования относительно быстро формирует монодоминантные группировки, вытесняя даже такие виды как крапива [49]. По сравнению с борщевиком, он не опасен для человека и животных, его можно использовать для производства фитопрепаратов, биокорректоров, продуктов функционального и диетического питания, биоэтанола и другой продукции, пользующейся повышенным спросом на внутреннем и внешних рынках [50]. В качестве альтернативы топинамбуру можно использовать также козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.). На особо плодородных почвах высота растения может достигать 1,5 м. Растения этого вида могут произрастать на различных типах почв, формируя хорошо развитую корневую систему, которая может уходить в глубину до 80 см и давать отростки. Формируя новые стебли, посевы данной культуры со временем загущаются, что делает данную культуру эффективной для борьбы с борщевиком [46].

Учитывая тот факт, что на инвазивность борщевика Сосновского оказывает влияние плотность фитоценозов, в рамках борьбы с его распространением рекомендуют высевать на полях виды, формирующие плотный травостой. Среди них щетинник сизый (*Setaria glauca* (L.) Beauv.), овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), одуванчик лекарственный (*Taraxacum officinale* Wigg.) и другие [51].

Борщевик часто встречается на пустырях и заброшенных землях. Борьба с этим сорняком на таких пустых участках поможет высадка замещающих культур [52], в том числе ели (*Picea abies* (L.) Karst.) и/или сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Высаживают 3–10-летние саженцы этих деревьев с шагом 1–1,5 м с расстоянием между рядами 1–2 м. При смыкании крон замещающих культур происходит вытеснение борщевика Сосновского из фитоценоза.

### Мутуализм в инвазивности борщевика Сосновского

Биотическое опыление имеет особую значимость для полового размножения цветковых растений. Оно позволяет поддерживать генетическое разнообразие, стимулирует адаптацию растений. Представители зонтичных (Asteraceae) взаимодействуют с чрезвычайно широким кругом как просто посетителей,

использующих цветки как место отдыха или объект для лимфофагии, так и опылителей. У борщевика Сосновского это жуки – олёнка зловонная (*Oxythyrea funesta* (Poda, 1761)) и мягкотелка рыжая (*Rhagonycha fulva* (Scopoli, 1763)), мухи-журчалки – журчалка осовидка (*Temnostoma vespiforme* (Linnaeus, 1758)), мускоидные мухи – муха комнатная (*Musca domestica* (Linnaeus, 1758)), иные – оса рода Бетелида (*Bethylida* sp.), иные пчёлы – пчёлы р. Андрина (*Andrena* sp.), медоносные пчёлы – пчела медоносная (*Apis mellifera* (Linnaeus, 1758)) [53].

Известны насекомые – паразиты и хищники, находящиеся на борщевике хозяев и жертв. К этой группе относится ихневмонида *Triclistus pallipes* (Holmgren, 1873), личинки которой паразитируют на гусеницах зонтичной моли *E. chaerophyllella*. Складчатокрылые осы *Dolichovespula saxonica* (Fabricius, 1793), помимо питания на цветках борщевика, попутно могут охотиться на мух или собирать мелких гусениц. Роющие осы-краброниды *Gorytes quinquecinctus* (Fabricius, 1793), добычей которых являются цикадки, могут также использовать борщевик для охоты. Из мух-тахин только один вид – *Strongygaster globula* (Meigen, 1824), паразит взрослых муравьёв р. *Lasius* – может как питаться на растении, так и искать на нём хозяина [49].

По сравнению с другими зонтичными растениями (например, с *Seseli libanotis*) на соцветиях борщевика отмечается большее видовое разнообразие насекомых. Это указывает на то, что борщевик Сосновского способен эффективно конкурировать с местными видами зонтичных за привлечение насекомых-опылителей [53].

В связи с большой значимостью опылителей борьбу с борщевиком Сосновского возможно вести посредством уничтожения его опылителей, в том числе с помощью фитофагов [54].

Борщевик Сосновского размножается при помощи семян. В среднем одно растение борщевика даёт до 20000 семян, большинство которых из-за сравнительно большой массы опадают и прорастают вблизи материнской особи. Однако отмечается значимая роль в распространении семян человеком на одежде, обуви; животными на шкуре [55, 56]. Достоверные сведения о том, что семена поедаются и разносятся птицами, отсутствуют [57].

Способствуют росту растений, а, следовательно, масштабированию инвазивности, ассоциации грибов или бактерий с борщевиком

(микоризные или ризобияльные симбиозы соответственно). Сравнение аборигенных дрожжевых сообществ в почвах под борщевиком с соседней луговой растительностью позволило выявить в них более низкую долю аскомицетовых видов *Candida vartiovaarae* (Capr.) и *Wickerhamomyces anomalus* (Hansen, 1889), более высокую – дрожжеподобных грибов, обладающих высокой гидролитической активностью (*Trichosporon moniliforme* и *Trichosporon porosum*) [58]. С высокой представленностью в ризосфере и ризоплане актиномицетов, для которых характерна антифунгальная активность, связывают инвазивность *H. sosnowskiji* [59, 60].

### Заключение

Регуляция численности борщевика Сосновского возможна посредством агентов биологического контроля: неклеточных организмов, фитофагов, насекомых-паразитов, фитопатогенных грибов, брюхоногих моллюсков.

Для сдерживания распространения борщевика Сосновского важно создавать межвидовую конкуренцию со стороны других растений. Эффективными конкурентами, из числа описанных в литературе агентов биологического контроля, могут быть быстрорастущие многолетние травы, формирующие плотную дернину (мятлик луговой, лисохвост луговой, кострец безостый и др.); перекрывающие доступ к свету (козлятник восточный и топинамбур). Для вытеснения борщевика с пустырей и заброшенных земель рекомендуется высаживать хвойные деревья, которые при смыкании крон будут угнетать его рост.

Ограничить распространение борщевика также возможно посредством уничтожения его опылителей. Однако данный способ несёт более негативные последствия для окружающей среды, чем инвазия борщевика.

Таким образом, использование имеющихся данных о биологических агентах контроля в борьбе с борщевиком Сосновского имеет определённую перспективу. Однако экспериментальный потенциал о влиянии биотических факторов на снижение численности борщевика Сосновского пока крайне ограничен, в связи с этим существует необходимость в дополнительных научных исследованиях. Перед их применением необходимо убедиться в безопасности для окружающей среды.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по*

теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

### References

1. Grzędzicka E. Invasion of the giant hogweed and the Sosnowsky's hogweed as a multidisciplinary problem with unknown future – a review // *Earth*. 2022. V. 3. No. 4. P. 287–312. doi: 10.3390/earth3010018
2. Petrova I.F., Koroleva E.G. Assessment of the distribution of Sosnowsky's hogweed in Russia // *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. 2022. V. 86. No. 5. P. 788–798 (in Russian). doi: 10.31857/S2587556622050090
3. Chadin I., Dalke I., Zakhochiy I., Malyshev R., Madi E., Kuzivanova O., Kirillov D., Elsakov V. Distribution of the invasive plant species *Heracleum sosnowskyi* Manden. in the Komi Republic (Russia) // *PhytoKeys*. 2017. V. 77. P. 71–80. doi: 10.3897/phytokeys.77.1186
4. Kuklina A.G., Ozerova N.A., Shvetsov A.N., Shaykina M.N., Yolkina E.S. Trends in the settlement of invasive plant species on the territory of the nature sanctuary “Forested Ravine near the Village of Vlasievo” (Moscow Oblast) // *Russ. J. Biol. Invasions*. 2024. V. 15. P. 63–72. doi: 10.1134/S2075111724010089
5. Bogdanov V.L., Nikolaev R.V., Shmeleva I.V. Invasion of the environmentally dangerous plant Sosnowsky's hogweed (*Heracleum Sosnowskyi* Manden.) in the European part of Russia // *Regionalnaya ekologiya*. 2014. No. 1–2(131). P. 43–52 (in Russian).
6. Kondratiev M.N., Budarin S.N., Larikova Yu.S. Physiological and ecological mechanisms of invasive penetration of Sosnowskyi hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in unexploitable agroecosystems // *Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2015. No. 2. P. 36–49 (in Russian).
7. Kaplin V.G. Distribution of an invasive species of *Heracleum sosnowskyi* Manden. (Apiaceae) in Leningrad oblast // *Russ. J. Biol. Invasions*. 2023. V. 14. No. 3. P. 338–353. doi: 10.1134/S2075111723030086
8. Sinitsyna A. The motherland of the giant hogweed: how giant hogweed became a botanical symbol of contemporary Russia // *Lagoonscapes*. 2023. V. 3. No. 1. P. 61–76. doi: 10.30687/LGSP/2785-2709/2023/01/006
9. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhochiy I.G. Analysis of management activities on control of Sosnowskyi's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) invasion on the territory of the Russian Federation // *Russ. J. Biol. Invasions*. 2018. V. 11. No. 3. P. 44–61 (in Russian).
10. Throughout the Kirov region there is a fight against hogweed [Internet resource] <https://www.kirovreg.ru/> (Accessed: 10.06.2024) (in Russian).
11. Ashikhmina T.Ya., Tovstik E.V., Adamovich T.A. Ecological factors determining the natural and anthropogenic invasion of *Heracleum sosnowskyi* Manden., measures to combat it (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 20–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-020-031
12. Traveset A., Richardson D.M. Plant invasions: the role of biotic interactions – an overview // *Plant Invasions: The Role of Biotic Interactions* / Eds. A. Traveset, D.M. Richardson. CAB International, Wallingford, 2020. P. 1–25. doi: 10.1079/9781789242171.0001
13. Mitchell Ch.E., Agrawal A.A., Bever J.D., Gilbert J.S., Huffbauer R.A., Klironomos J.N., Maron J.L., Morris W.F., Parker I.M., Power I.J., Seabloom E.W., Torchin M.E., Vázquez D.P. Biotic interactions and plant invasions // *Ecol. Lett.* 2006. V. 9. No. 6. P. 726–740. doi: 10.1111/j.1461-0248.2006.00908.x
14. Stenber J.A., Sundh I., Becher P.G., Björkman C., Dubey M., Egan P.A., Friberg H., Gil J.F., Jensen D.F., Jonsson M., Karlsson M., Khalil S., Ninkovic V., Rehmann G., Vetukuri R.R., Viketoft M. When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications // *J. Pest Sci.* 2022. V. 94. P. 665–676. doi: 10.1007/s10340-021-01354-7
15. Nathan P., Economo E.P., Guénard B., Simonsen A.K., Frederickson M.E. Generalized mutualisms promote range expansion in both plant and ant partners // *Proc. R. Soc. B*. 2023. V. 290. No. 2006. Article No. 20231083. doi: 10.1098/rspb.2023.1083
16. Cooper I., Jones R.A.C. Wild plants and viruses: under-investigated ecosystems // *Adv. Virus Res.* 2006. V. 67. P. 1–47. doi: 10.1016/S0065-3527(06)67001-2
17. Bem F., Murant A.F. Transmission and differentiation of six viruses infecting hogweed (*Heracleum sphondylium*) in Scotland // *Ann. Appl. Biol.* 1979. V. 92. No. 2. P. 237–242. doi: 10.1111/j.1744-7348.1979.tb03869.x
18. Sokornova S.V., Afonin A.N., Maximova E.B., Pervushin A.L. Influence of temperature and humidity parameters on infection of the giant hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) by mycelium phytopathogenic fungus *Phoma complanata* // *Problems of mycology and phytopathology in the XXI century: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta AN SSSR, professora Artura Arturovicha Yachevskogo*. Sankt-Peterburg: Copi-R Group, 2013. P. 250–252 (in Russian).
19. Krivosheina M.G. Insects – pests of Sosnovski's hogweed in the Moscow region and prospects for their use in biological control // *Russ. J. Biol. Invasions*. 2011. V. 4. No. 1. P. 44–51.
20. Luneva N.N. Sosnovskyi's hogweed in the Russian Federation // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2014. No. 3. P. 12–18 (in Russian).
21. Pavlov A.V., Ermakova K.V., Dolgoplov I.E. Frachnik larvae are natural pests of Sosnovsky's hogweed // *Natural science: research and teaching: materialy konferentsii “Chteniya Ushinskogo”*. Yaroslavl: RIO YAGPU, 2020. P. 242–246 (in Russian).

22. Volovnik S.V. On connections between lixine weevils and different plant organs (*Coleoptera, Curculionidae, Lixinae*) // Caucasian Entomological Bull. 2008. V. 4. No. 1. P. 87–91 (in Russian). doi: 10.23885/1814-3326-2008-4-1-87-91
23. Krivosheina M.G. New data on the biology and distribution of the agromysid fly *Phytomyza pastinacae* Hendel, 1923 (Diptera: Agromyzidae) // Caucasian Entomological Bull. 2012. V. 8. No. 2. P. 319–320 (in Russian). doi: 10.23885/1814-3326-2012-8-2-319-320
24. Krivosheina M.G., Ozerova N.A. To the biology of celery fly *Euleia heraclei* (Linnaeus, 1758) (Diptera: Tephritidae) – pest of alien Apiaceae species in Moscow Region // Russian Entomol. J. 2016. V. 25. No. 2. P. 209–213. doi: 10.15298/rusentj.25.2.08
25. Lazarev A.M. Watch out – Sosnovsky's hogweed! // Zashchita i karantin rasteniy. 2013. No. 8. P. 50–52 (in Russian).
26. Pisareva M.V., Akinshin P.I. *Heracleum Sosnovskii* in Paratunka sanatorium-resort zone (Eastern Kamchatka) // Conservation of biodiversity of Kamchatka and coastal waters: materials of XVIII international scientific conference, dedicated to the 70th anniversary of P.A. Khomentovskiy's birthday. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamchatpress, 2017. P. 252–255 (in Russian).
27. Filippov D.A. *Papiliomachaon linnaeus*, 1758 (Insecta, Lepidoptera, Papilionidae) in the Vologda region // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2015. No. 8–4. P. 697–701 (in Russian).
28. Shklyarevich G.A. On the ecology of the swallowtail *Papilio machaon* L. on the Kola Peninsula // Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2008. No. 1 (90). P. 83–86 (in Russian).
29. Kudryavtseva E.N. Ecological monitoring and phytosanitary rehabilitation of natural and anthropogenically modified landscapes of the central and northwestern regions of Russia infested with giant hogweed: Cand. biol. sci. diss. Abstr. Moskva, 2013. 28 p. (in Russian).
30. Pestov S.V., Filippov N.I. Phytophages of Sosnovsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in the Komi Republic // Actual issues of agrarian science: theory and practice: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 70-letiyu agronomicheskogo fakulteta. Kirov: Vyatskaya GSKhA, 2014. P. 149–151 (in Russian).
31. Pavlova N.A., Berestetskiy A.O. Selection of herbicides for joint use with the fungus *Calophoma complanata* against Sosnovsky's hogweed on non-arable lands // Current Mycology in Russia. V. 9. Materialy pyatogo sezda mikologov Rossii. Moskva: Natsionalnaya akademiya mikologii, 2022. P. 400–402 (in Russian).
32. Gasich E.L., Khlopunova L.B., Berestetskiy A.O., Sokornova S.V. Strains of fungi *Phoma complanata* (Tode) Desm. 1.40 (AIPP) myco-herbicidal active against hogweed Sosnowski // Patent RU 2439141 C1. Application: 2010140887/10, 2010.10.06. Date of publication: 01.10.2012. Bull. 1 (in Russian).
33. Gasich E.L., Khlopunova L.B., Berestetskiy A.O. Effect of ecological factors on *Calophoma complanata* pathogenicity for *Heracleum sosnowskyi* // Mikologiya i fitopatologiya. 2018. V. 52. No. 3. P. 207–216 (in Russian).
34. Vakhrusheva T.E., Pereverzev D.S. Diseases and pests of Siberian hogweed // Zashchita rasteniy. 1984. No. 3. P. 53 (in Russian).
35. Kudryavtsev N.A., Krutin A.A., Kudryashov O.D. Innovative approach to limiting the spread of giant hogweed and the possibility of its use in the national economy (including in the cultivation of mollusks) // Innovative technologies in agro-industrial complex of the region: achievements, problems, prospects of development: sbornik nauchnykh trudov po materialam Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tver: FGBOU VO Tverskaya GSKhA, 2021. P. 207–210 (in Russian).
36. Temreshev I.I., Kopzhasarov B.K., Beknazarova Z.B., Isina Zh.M., Dzhanbatyrov A.Sh. New and little-known invertebrate species that damage cultivated apple tree (*Malus domestica*) and sivers apple tree (*Malus sieversii*) in the southeast of Kazakhstan. Message 1. Mollusca // Bulletin of the L.N. Gumilyov ENU. Bioscience Series. 2022. No. 2 (139). P. 29–43. doi: 10.32523/2616-7034-2022-139-2-29-43 (in Russian).
37. Tkachenko K.G. *Heracleum L. genus* – economic plants // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Biologiya. Nauki o Zemle. 2014. No. 4. P. 27–32 (in Russian).
38. Zhuk A.A., Odinaevs F. Methods of combating hogweed (*Heracleum spondylium*) and the possibility of their application in the Kaliningrad region // Vestnik Baltiyskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Ser.: Estestvennye i meditsinskie nauki. 2023. No. 2. P. 75–83. doi: 10.5922/gikbfu-2023-2-6 (in Russian).
39. Prokhorov V.N., Laman N.A., Babkov A.V., Sak M.M. Measures to limit the spread of Sosnovsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) // Problems of greening of large cities: sbornik materialov XXI Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo foruma. Moskva: Izdatelstvo "Pero", 2019. P. 76–79 (in Russian).
40. Kalugina E.A. Positive and negative effects of hogweed in animal husbandry // Information technologies as a basis for effective innovative development: sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ufa: OMEGA SCIENCE, 2023. P. 93–95 (in Russian).
41. Yakushenko O.S., Mechukaev A.A. The influence of eating Sosnovsky's hogweed on the quality of sour-milk products and skin lesions of cattle in the conditions of natural forage lands in the foothills of the Kabardino-Balkarian Republic // Achievements of young scientists in the development of agricultural science and the agro-industrial complex: materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh.

Solenoe Zaymishche: FGBNU “PAFNTs RAN”, 2019. P. 225–230 (in Russian).

42. Dalke I.V., Chadin I.F. Modeling the rate of increase in the area of cenopopulations of *Heracleum sosnowskyi* Manden. and *Heracleum mantegazzianum* Sommier & Levier // Russ. J. Biol. Invasions. 2023. V. 16. No. 3. P. 30–47 (in Russian). doi: 10.35885/1996-1499-16-3-30-47

43. Semchuk N.N., Balun O.V., Gladkikh S.N., Perekopsky A.N. Destruction of an invasive species Sosnowsky’s hogweed by ecological means // AgroEkoInzheneriya. 2022. No. 4 (113). P. 104–110 (in Russian).

44. Chadin I.F., Dalke I.V. Method of destruction of thicket giant hogweed on non-agricultural land // Patent RU 2399204 C2. Application: 2008136427/12, 09.09.2008. Date of publication: 20.09.2010. Bull. 26 (in Russian).

45. Bogdanov V.L., Shmeleva I.V., Glushchenko A.B., Korolev A.V., Kuts A.Yu., Severyanov K.D. The ways of control distribution of *Heracleum sosnowskyi* Manden. in-troducenta // Regional Environmental Issues. 2007. No. 2. P. 78–85 (in Russian).

46. Zelenkov N.A., Fomin D.S., Zubarev Yu.N. Use of mediator plants to combat Sosnowski’s hogweed // Farming and crop protection technologies: intellectual, innovative and digital resources: materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Perm: Izd-vo IPTs “Prokrost”, 2023. P. 121–125 (in Russian).

47. Starovoytov V.I., Starovoytova O.A., Zvyagintsev P.S., Lazunin Yu.T. Jerusalem artichokes – the culture of multipurpose use // Pishchevaya promyshlennost. 2013. No. 4. P. 22–25 (in Russian).

48. Titok V., Veevnik A., Yaroshevich M. Jerusalem artichoke – a crop with multifunctional purpose // Nauka i innovatsii. 2014. No. 135. P. 26–28 (in Russian).

49. Chumakov L.S., Maslovsky O.M., Rybko N.G. Potentially dangerous invasive plant species *Impatiens glandulifera* Royle and *Helianthus tuberosus* L. in Belarus // Introduction, conservation and utilization of biological diversity of flora: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu Tsentralnogo botanicheskogo sada Natsionalnoy akademii nauk Belarusi. Minsk: Beltamozhservic, 2022. P. 488–491 (in Russian).

50. Kholomkina Y.I., Pashkov A.N., Kartashova N.M., Cheprasova A.A., Parfenova N.V. The influence of allelopathic properties of Sosnowsky hogweed on the germination of seeds of weeds and cultivated plants // Proceedings of conferences of the State Research Institute “Natsrazvities”: collection of selected papers. Sankt-Peterburg: GNI “Natsrazvities”, 2021. P. 16–18 (in Russian).

51. Luneva N.N. *Heracleum sosnowskyi* in Russia: present status and relevance of its fastest suppression // Vestnik zashchity rasteniy. 2013. No. 1. P. 29–43 (in Russian).

52. Stepanov G.P. Method for destruction of Sosnowsky’s hogweed // Patent RU (11) 2 706 466(13) C1. Application: 2019101296, 15.01.2019. Date of publication: 19.11.2019. Bull. 32 (in Russian).

53. Dorohin D.M., Lysenkov S.N., Elumeeva T.G. Comparison of ranges of insects visiting some Apiaceae species in Moscow oblast // Byulleten Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel biologicheskoy. 2019. V. 124. No. 2. P. 25–34 (in Russian).

54. Ustinova E.N., Savina K.A., Lysenkov S.N. New data on consortive associations of *Heracleum sosnowskyi* with anthophilous insects // Russ. J. Biol. Invasions. 2017. V. 10. No. 3. P. 98–112 (in Russian).

55. Linkov V.V. Agrotechnological and selection-genetic bases for the elimination of introduced Sosnowsky’s hogweed from the natural environment of the distribution area // Innovatsionnoye razvitiye APK: problemy i perspektivy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Smolensk: Smolenskaya gosudarstvennaya sel’skokhozyaystvennaya akademiya, 2015. P. 369–376 (in Russian).

56. Arepieva L.A., Arepiev E.I., Kazakov S.G. Distribution of Sosnowsky’s hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) at the southern border of its secondary range in European Russia // Russ. J. Biol. Invasions. 2021. V. 12. P. 233–243. doi: 10.1134/S2075111721030024

57. Krivosheina M.G., Ozerova N.A., Petrosyan V.G. Distribution of seeds of giant hogweed (*Heracleum Sosnowskyi* Manden.) in the winter period // Russ. J. Biol. Invasions. 2020. No. 3. P. 22–31 (in Russian).

58. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Chernov I.Yu. Soil yeast communities under the aggressive invasion of Sosnowsky’s hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) // Pochvovedenie. 2015. No. 2. P. 221–227 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X15020045

59. Tovstik E.V., Shirokih A.A., Shirokih I.G. Microbiological communities of the root zone of Sosnowsky’s hogweed // Vestnik sovremennykh issledovaniy. 2018. No. 10.7 (25). P. 184–186 (in Russian).

60. Tovstik E.V., Sazanov A.V., Bakulina A.V., Shirokih I.G., Ashikhmina T.Ya. Identification and study of the properties of *Streptomyces geldanamycininus* 3K9, isolated from the soil under the bush of *Heracleum sosnowskyi* // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 53–60 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-053-060

## Источники кадмия, анализ пределов содержания, стратегии снижения в окружающей среде (обзор)

© 2024. Д. В. Петухов, к. х. н., доцент,  
Е. В. Товстик, к. б. н., с. н. с., доцент,  
Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: usr20941@vyatsu.ru

В работе проанализированы основные источники кадмия в окружающей среде и пути его миграции. Показано, что кадмий является одним из приоритетных загрязнителей воздуха и почвы в промышленных регионах. Попадая в организм человека, он блокирует функции ферментов и может вызывать серьезные заболевания. В связи с высокой опасностью содержание кадмия нормируется в почве (от 0,5 до 2,0 мг/кг), удобрениях (3 и 20 мг/кг  $P_2O_5$ ), продуктах питания (0,02–1,0 мг/кг), продовольственном зерне (0,1 мг/кг), комбикормах для сельскохозяйственных животных (0,3–0,4 мг/кг). Противодействием попадания кадмия в пищевые цепи является фиторемедиация. В качестве гипераккумуляторов кадмия используют лантану сводчатую, горчицу сарептскую, рапс, клеверину, табак. Для повышения фиторемедиационной эффективности растений-гипераккумуляторов проводят их трансформацию фитохелатиновыми генами, кодирующими синтез металлсвязывающих пептидов; подкисляют почвы; используют штаммы эндофитных бактерий и органические добавки. Значительно уменьшить воздействие кадмия на организм человека позволяют агрономические методы, регулирующие поглощение ионов токсичного металла сельскохозяйственными культурами. Среди них повышение устойчивости растений к кадмиевому стрессу и снижение уровня накопления токсичного металла в них.

**Ключевые слова:** кадмий, миграция, предельно допустимая концентрация, почва, зерно, ремедиация.

## Cadmium sources, limit analysis, environmental mitigation strategy (review)

© 2024. D. V. Petukhov ORCID: 0000-0002-7733-5250  
E. V. Tovstik ORCID: 0000-0003-1861-6076  
Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: usr20941@vyatsu.ru

The paper systematizes information on anthropogenic environmental pollution by cadmium, pathways of Cd distribution, toxicity, and strategies to reduce Cd content in soil and crop products. The relevance stems from the need to develop strategies to prevent long-term exposure to cadmium in the human body, which has significant consequences for public health and environmental safety. The paper analyzes in detail the sources and migration pathways of cadmium in the environment. It is shown that cadmium is one of the main air and soil pollutants in industrial regions. Its presence in the environment is aggravated by natural phenomena. Cadmium compounds are capable of traveling long distances with air currents, resulting in deposition in areas remote from pollution sources. Special attention is paid to the mechanisms of cadmium accumulation in the soil and its subsequent transfer to plants, which leads to its penetration into the food chain. Cd is non-essential element for plants. Cadmium has carcinogenic properties. Once in the human body, it blocks enzyme functions and can provoke serious diseases. Due to the high danger, cadmium content is normalized in soil (from 0.5 to 2.0 mg/kg), fertilizers (3 and 20 mg/kg  $P_2O_5$ ), food (0.02–1.0 mg/kg), food grains (0.1 mg/kg), animal feed (0.3–0.4 mg/kg). Phytoremediation is an effective way to reduce the ingress of cadmium into the food chain. *Lantana camara* L., *Brassica juncea* (L.) Czern., *Brassica napus* L., *Nicotiana tabacum* L., castor oil are used as cadmium hyperaccumulators. Soil acidification, inoculation with endophytic bacterial strains, chelating organic additives, and transformation of hyperaccumulator plants with phytochelatin genes encoding the synthesis of metal-binding peptides have been used to enhance phytoremediation efficiency. Agronomic methods that regulate the absorption of toxic metal by agricultural crops can significantly reduce the effects of cadmium in the human body. Increasing the resistance of plants to cadmium stress and reducing the accumulation of toxic metal in them are among them.

**Keywords:** cadmium, migration, maximum permissible concentration, soil, grain, remediation.

Высокая антропогенная нагрузка является причиной загрязнения экосистем различными поллютантами, в том числе тяжёлыми металлами (ТМ). Согласно докладу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) от 2019 г. «Exposure to cadmium: a major public health concern», одним из наиболее опасных загрязнителей окружающей среды (ОС), оказывающих негативное влияние на здоровье человека, является кадмий. Несмотря на то, что кадмий играет важную роль в производстве многих товаров, его использование в различных отраслях промышленности связано с определёнными рисками. Кадмий не поддаётся биологическому разложению и присутствует на различных трофических уровнях пищевой цепи, что вызывает обеспокоенность в отношении безопасности пищевых продуктов [1]. В настоящее время верхние пределы поступления кадмия в организм человека составляют 0,83 мкг/кг массы тела/день. Однако имеются данные о том, что кадмий опасен для человека и в более низких концентрациях [2].

В связи с этим исследование процессов миграции кадмия в ОС, пределов его содержания в почве и растениеводческой продукции играет важную роль в разработке стратегий по предотвращению долгосрочного воздействия кадмия на организм человека, что имеет значительные последствия для общественного здоровья и экологической безопасности.

Цель работы – систематизация информации о вкладе антропогенных источников в загрязнение окружающей среды кадмием, путях его миграции, токсичности и стратегиях снижения содержания в почвах и растениеводческой продукции.

### Объекты и методы исследования

Материалы для данного обзора были отобраны в научных электронных библиотеках eLibrary.ru и КиберЛенинка, а также в поисковых системах по полным текстам научных публикаций Google Scholar, ACS Publications, ScienceDirect, Springer.

Критерием отбора источников для систематизации информации служили ключевые слова: «кадмий», «антропогенные источники», «пределы содержания», «почва», «удобрения», «продукты питания», «пищевая цепь», «токсичность», «ремедиация», «устойчивость к кадмию» и их английские варианты. В исследовании подробно анализируется, как кадмий, накапливаясь в почве и растениях, попадает

в организм человека и оказывает воздействие на его здоровье.

Для актуализации информации по рассматриваемой проблеме были в основном использованы научные публикации за период с 2013 по 2024 гг.

### Источники и пути миграции кадмия в окружающей среде

Кадмий является одним из ТМ, часто встречающихся в воздухе и почве промышленных агломераций [3]. Попадание кадмия в атмосферу происходит в виде частиц, состоящих из его оксида (CdO), образующегося в ходе высокотемпературных процессов при выплавке металлов из руд (45% общего загрязнения этим элементом), а также при сжигании угля и изделий, содержащих этот элемент [4]. Пыльные бури, вулканическая деятельность, выветривание, эрозия, лесные пожары также являются причинами повышения содержания кадмия в ОС. Вероятность атмосферного осаждения кадмия особенно высока в районах заброшенных металлических рудников [5]. Среднегодовой уровень содержания кадмия в атмосферном воздухе в холодный период года достигает 0,14 нг/м<sup>3</sup>; в атмосферных осадках – 0,035–0,13 мкг/л [5]. Кадмий способен перемещаться с потоком воздуха на значительные расстояния, в связи с чем его можно встретить на территориях, где отсутствуют его локальные источники загрязнения [6]. Среднегодовые потоки кадмия из атмосферы на поверхность почвы в центральной части европейской территории России в 2 раза меньше, чем в северных районах, и оцениваются как 0,030±0,005 кг/км<sup>2</sup>/год [7].

Значительная доля произведённого кадмия используется как компонент вторичных электрохимических источников тока: Ni-Cd аккумуляторы, Pb-Cd и Hg-Cd батарейки [8]; также его включают в состав антикоррозионных покрытий для микроэлектроники [9, 10], сплавов для изготовления регулирующих и аварийных стержней в атомных реакторах [11]. Кадмий в виде металла, сплава или его соединений входит в состав таких потребительских товаров как персональные компьютеры (<50 мкг/г), упаковочные материалы, краски, ювелирные изделия (<100 мкг/г) [12]. В СанПиН 2.4.7/1.1.1286-03 отмечено, что выделение кадмия, содержащегося в 1 кг любых материалов игрушки, не должно превышать 75 мг, формирующихся масс и красок – 50 мг. Вторичное производство кадмия в мире, в том

числе при переработке Ni-Cd батарей, составляет около 20% полного металлического производства [13]. Как побочный продукт, кадмий выделяют при рафинировании цинка, меди и свинца из сульфидных руд [4]. Отработанные материалы и изделия на основе кадмия, попадая в почву в форме производственных и бытовых отходов, а также продуктов горения в атмосферу, вносят значительный вклад в загрязнение ОС данным элементом [14].

Источниками кадмия являются также предприятия по производству пигментов, керамических изделий, аккумуляторов [15], цемента. Значимый вклад в загрязнение почв кадмием вносит эксплуатация автотранспорта [16–19], использование осадков сточных вод, фосфорных удобрений [20–22], пестицидов на основе глифосата [23, 24].

### Попадание кадмия в пищевую цепь и токсичность

Согласно ГОСТ 17.4.1.02-83, кадмий классифицируется как канцероген 1-й группы. Он не входит в число необходимых для растений элементов питания [25, 26]. Растворимые формы кадмия в почве представлены чаще всего в виде анионов ( $\text{Cd}(\text{HS})_4^{2-}$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_3^-$ ,  $\text{Cd}(\text{OH})_4^{2-}$  и  $\text{CdCl}_3^-$ ) и катионов ( $\text{CdHS}^+$ ,  $\text{CdOH}^+$ ,  $\text{CdHCO}_3^+$ ,  $\text{CdCl}^+$ ) [27]. Накапливаясь в почве, в том числе за счёт атмосферных выпадений, кадмий, в силу высокой мобильности, эффективно поглощается корневой системой растений и мигрирует по трофическим цепям [17, 28]. Попадая в организм человека, он оказывает патогенное действие, выражающееся в блокировании сульфгидрильных (SH) групп более 100 ферментов [29].

Среди продуктов растительного происхождения основными источниками кадмия для человека считают преимущественно злаки (зерновые) и листовые овощи. При этом отмечается, что степень усвоения кадмия из пищи хуже, чем с вдыхаемым воздухом (в том числе при курении). Установлено, что питьё «мягкой» воды повышает биодоступность кадмия из продуктов питания [29].

Поглощение кадмия из пищи осуществляется теми же транспортными системами, которые организм использует для получения кальция, железа, цинка и марганца. Установлено, что кадмий оказывает двухстороннее действие на физиологию кишечника. С одной стороны, он вызывает изменение структуры бактериальных популяций и их относительной численности (увеличение соотношения

*Bacteroidetes* и *Firmicutes*), что приводит к увеличению продукции липополисахаридов. С другой стороны, вызывает воспалительную реакцию и повреждение клеток кишечника, что приводит к увеличению проницаемости стенок для макромолекул [30]. Предполагается, что после всасывания в желудочно-кишечном тракте кадмий образует слабые связи с белками плазмы (альбумин), и переносится через портальную систему кровообращения к клеткам печени, где индуцирует синтез специфического металлсвязывающего белка с низким содержанием цистеина – металлотионеина (Cd-МТ) [31], который, выделяясь из печени в кровоток, достигает почек. После фильтрации он реабсорбируется в проксимальных канальцах и откладывается в почках в свободной форме. Последняя способна вызывать оксидативный стресс и повреждение клеток [32].

Накопление кадмия в организме человека в тяжёлых случаях вызывает остеопороз и остеомаляцию. Один из предполагаемых механизмов влияния кадмия на кости заключается в том, что металл нарушает почечный метаболизм витамина D, вследствие чего повышенное выведение кальция с мочой приводит к деминерализации [33].

В истории известны случаи потребления населением кадмия с пищей на уровне 300 мкг/день. В результате хронического воздействия у людей развивалась болезнь итай-итай, характеризующаяся нарушениями работы почек, остеомаляцией и остеопорозом. При этом большему риску развития заболевания были подвержены женщины (97,5%), чем мужчины [34].

Индикатором для оценки содержания кадмия в организме человека являются волосы, кровь, моча [35]. Референсным значением присутствия кадмия в организме человека является наличие его в крови на уровне 0,00015 мкг/мл.

### Допустимые пределы и уровень содержания кадмия

Биодоступность и накопление кадмия в почвенно-растительных системах являются основным фактором его переноса на разные трофические уровни (рис.) [36]. В связи с этим содержание кадмия нормируется в почве, удобрениях, продовольственном сырье и пищевых продуктах.

**Почва.** Уровень содержания кадмия в почвах мира варьирует в широком диапазоне

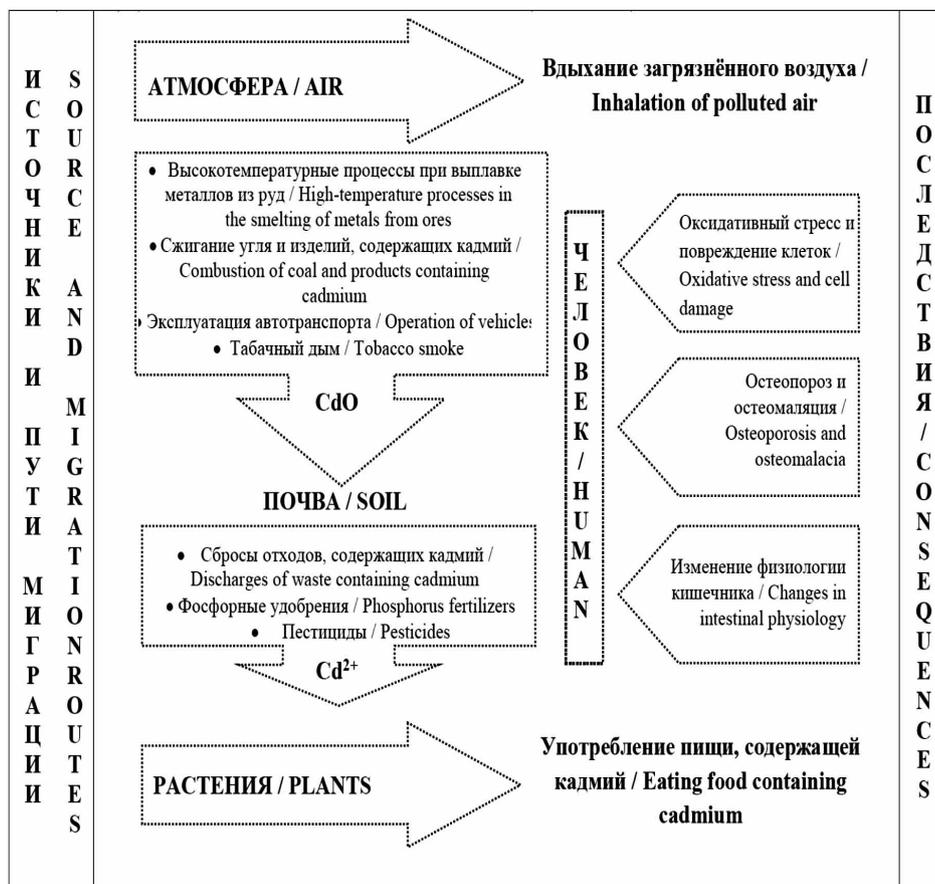


Рис. Блок-схема основных источников поступления, путей миграции и опасности кадмия для человека  
 Fig. Diagram of the main sources of cadmium intake, migration routes and hazard to humans

Таблица 1 / Table 1

Содержание кадмия в пахотных почвах России  
 Cadmium content in arable soils of Russia

Федеральный округ Federal District	Год Year	Среднее значение Average	Минимум Minimum	Максимум Maximum	Источник Source
Центральный ** Central	2016	0,32	0,28	0,36	[40]
Северо-Западный* North-West	2007	0,110	0,6	1,73	[41]
Южный* / South	2019	0,25	0,16*	0,27*	[42]
Приволжский* / Volga	2019	0,06*	0,04	0,08	[43]
Уральский* / Ural	2022	0,034	0,019	0,05	[44]
Сибирский* / Siberian	2017	0,25	0,13	0,36	[45]
Дальневосточный* Far Eastern	2021	0,17	0,10	0,24	[46]

Примечание: \* – для подвижных соединений; \*\* – для валовых форм.  
 Note: \* – for mobile substances; \*\* – for bulk forms.

при средней концентрации 0,36 мг/кг [37, 38]. Согласно ВОЗ, почву, содержание кадмия в которой составляет 3,0 мг/кг, следует считать загрязнённой [39].

Согласно СанПиН 1.2.3685-21, в России ОДК (валовое содержание) кадмия для песчаных и супесчаных почв установлена на уровне

0,5 мг/кг; для суглинистых и глинистых почв – 1,0 мг/кг ( $pH_{KCl} < 5,5$ ) и 2,0 мг/кг ( $pH_{KCl} > 5,5$ ) соответственно.

Отмечено, что в число населённых пунктов, почвы которых загрязнены кадмием, входят города Свирск (Иркутская обл.), Кировоград, Ревда, Реж (Свердловская обл.),

Владикавказ (Республика Северная Осетия-Алания), Новосибирск (Новосибирская обл.) [3].

Уровень кадмия в пахотных почвах различных субъектов РФ значительно варьирует, зачастую не превышая ОДК (табл. 1).

Наличие кадмия в почвах определяется как антропогенными, так и естественными факторами. Значимое влияние на его содержание в почве оказывают процессы инфильтрации и выщелачивания [47].

Между содержанием кадмия в почве и наличием его в урожае существует прямая зависимость: поступающие в почву соли кадмия стимулируют переход в растворённое состояние валовых почвенных запасов, в результате чего количество подвижных соединений кадмия в почве оказывается равным или незначительно превалирует над содержанием его валовых форм [48].

**Удобрения.** Согласно Регламенту (ЕС) 2019/1009 Европейского парламента и Совета от 5 июня 2019 г., устанавливающего правила предоставления на рынок ЕС удобрений, содержание кадмия в удобрениях нормируется в пределах от 1,5 до 60,0 мг/кг в зависимости от их типа (табл. 2).

Согласно спецификации на удобрения и рекомендаций Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединённых Наций (ФАО), содержание кадмия в фосфатной породе для прямого внесения не должно превышать 27 мг/кг, для органических удобрений – 5 мг/кг, микроудобрений – 0,0025%.

Нормативная документация РФ (ГОСТ Р 58658-2019) регламентирует уровень кадмия в удобрениях в зависимости от вида и содер-

жания в нём фосфатов (не более 5% и равной или не менее 5%) – 3 и 20 мг/кг  $P_2O_5$  соответственно. Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01, допустимая концентрация кадмия в природных фосфатах, разрешённых для производства органических продуктов, не должна превышать 90 мг/кг  $P_2O_5$ .

Следует отметить, что содержание кадмия в фосфорных удобрениях сильно варьирует и зависит от происхождения фосфоритного сырья. Для фосфоритов, добываемых на территории России, характерно невысокое содержание кадмия, что определяет конкурентные преимущества удобрений, произведённых на их основе [49].

Массовая концентрация кадмия в органических удобрениях нормируется ГОСТ Р 53117-2008 и не должна превышать 2,0 мг/кг сухого вещества. Среди органических удобрений минимальное содержание кадмия отмечается в навозе крупного рогатого скота – 0,01, максимальное в навозных стоках – 1,76 мг/кг сухого вещества [40].

**Пищевые продукты, продовольственное сырьё, корма.** Несмотря на установленные пределы содержания кадмия в продуктах питания, около 80% данного токсиканта поступает в организм человека через пищу [50]. Присутствие кадмия в продуктах питания сильно варьирует и зависит от географического положения, биодоступности кадмия из почвы, генетики сельскохозяйственных культур и используемых агрономических приёмов [51].

Нормы кадмия в различных категориях продуктов питания регламентированы СанПиН 2.3.2.1078-012, техническим регламентом Таможенного союза 021/20113 и составляют

Таблица 2 / Table 2

Нормы содержания кадмия в различных типах удобрений  
Standards for cadmium content in various types of fertilizers

Тип удобрения Fertilizer type	Содержание кадмия Cadmium content
Органические удобрения, неорганические улучшители почвы и биостимуляторы растений Organic fertilizers, inorganic soil improvers and plant biostimulants	1,5 мг/кг сухого вещества 1.5 mg/kg dry matter
Органические улучшители почвы и известковые материалы Organic soil improvers and liming materials	2 мг/кг сухого вещества 2 mg/kg dry matter
Неорганические удобрения макроэлементов и органоминеральные удобрения с содержанием $P_2O_5$ менее 5% Inorganic macronutrient fertilizers and organomineral fertilizers with $P_2O_5$ content less than 5%	3 мг/кг $P_2O_5$ 3 mg/kg $P_2O_5$
Неорганические удобрения макроэлементов и органоминеральные удобрения с содержанием $P_2O_5$ более 5% Inorganic macronutrient fertilizers and organomineral fertilizers with a $P_2O_5$ content of more than 5%	60 мг/кг $P_2O_5$ 60 mg/kg $P_2O_5$

0,02–1,0 мг/кг. Наиболее низкие значения установлены для продуктов, предназначенных для питания беременных и кормящих женщин, а также для детского питания [52].

Согласно СанПиН 2.3.2.1078-012, норма содержания кадмия в продовольственном зерне (пшеница, рожь, тритикале, овёс, ячмень, просо, гречиха, рис, кукуруза, сорго), семенах зернобобовых (горох, фасоль, маш, чина, чечевица, нут) составляет 0,1 мг/кг. Средняя концентрация кадмия в рисе может в 3 и 8 раз превышать его содержание в пшенице и других злаках соответственно [53].

Уровень кадмия в различных продуктах питания варьирует в широких пределах. Например, в картофеле, корнеплодах (морковь, свёкла) и овощах (кабачки, капуста, лук, огурцы, томаты, тыква, цукини), выращенных в районе размещения промышленных предприятий, содержание кадмия может достигать 0,002–0,004; 0,01–0,02; 0,005–0,009 мкг/кг сырого веса соответственно [54]. По данным субъектов РФ, концентрация кадмия в фруктах может достигать 0,012 мг/кг; в хлебобулочных изделиях – 0,026; крупах и макаронных изделиях – 0,043 мг/кг [55].

Согласно установленному временному максимально-допустимому уровню содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках (ВМДУ-87), уровень кадмия в комбикормах для сельскохозяйственных животных составляет 0,3–0,4 мг/кг; зерно, зернофураж, грубые и сочные корма, корнеклубнеплоды, корма микробного синтеза – 0,3 мг/кг; минеральные добавки – 0,4 мг/кг. В зонах промышленных выбросов и рудных разработок, где отмечается повышенная концентрация кадмия в кормах для животных, рекомендуется вводить в их рацион серу или тиосульфат натрия из расчёта 100–120 мг/кг корма.

### Ремедиация загрязнённых кадмием почв *in situ*

Для снижения вероятности попадания кадмия в пищевые цепи разрабатываются различные стратегии очистки почв от данного токсиканта [56]. Всё больший интерес вызывает ремедиация *in situ* [51], которая включает удаление кадмия из почвы или сдерживание его распространения на заданной территории [57].

Актуальным направлением ремедиации *in situ* является фиторемедиация. Способ предполагает использование растений гипер-

аккумуляторов, способных извлекать кадмий из почвы, накапливать и транслоцировать его от корня к побегу, и, при этом, выживать при высокой концентрации кадмия в тканях [58]. Резистентность к цитотоксичности ТМ у гипераккумуляторов чаще всего связывают с эффективной изоляцией поступающих поллютантов в различные клетки, что позволяет избегать их негативного влияния на процессы дыхания и фотосинтеза [59].

Способность растений накапливать кадмий зависит как от видоспецифичности, так и от концентрации кадмия в почве. Примерами гипераккумуляторов кадмия являются лантана сводчатая (*Lantana camera* L.) [60], горчица сарептская (*Brassica juncea* L.) [61], рапс (*Brassica napus* L.), клещевина (*Ricinus communis* L.) [62]. Выраженную естественную способность к поглощению кадмия из почвы и транслокацию его от стебля к листьям проявляет табак (*Nicotiana tabacum* L.) [63]. Концентрация кадмия в его листьях при выращивании на загрязнённых кадмием почвах может достигать 10 мг/кг [64]. Следует отметить, что табак, богатый кадмием, является одним из приоритетных путей попадания этого металла в организм человека при курении. Установлено, что от 81 до 90% кадмия, содержащегося в сигаретах, не только переносится в кровоток курильщика, но и в ОС с дымом [65].

Для повышения фиторемедиационной эффективности растений-гипераккумуляторов кадмия предлагается проводить трансформацию растений фитохелатиновыми генами (РРН), кодирующими синтез металлсвязывающих пептидов. В настоящее время создан вектор pCambia1305.1-rph6 для получения трансгенных модельных растений табака. Показано, что при концентрации кадмия в почве 100 мкМ трансгенные растения, экспрессирующие ген *rph6*, накапливают на 35% больше кадмия, чем контрольные растения [66]. Доказано, что продукт экспрессии гена *rph6his* – металлсвязывающий пептид, может быть перспективным кандидатом для повышения аккумулятивных свойств трансгенных растений табака. Трансформированные данным геном линии аккумулируют больше кадмия, чем контрольные растения; у линий наблюдаются признаки устойчивости к кадмиевому стрессу, выражающиеся в сохранении регенерационного потенциала и значительно меньшем уровне хлороза листьев [67].

Диссоциация в почвенном растворе и биодоступность кадмия напрямую связана со значениями pH: с уменьшением концентрации

ионов водорода в почве поглощение кадмия растениями снижается [68]. В связи с этим при фиторемедиации почвы подкисляют [69].

Поскольку фиторемедиация, по-прежнему, ограничена медленным ростом растений и длительностью восстановления почв, относительно новым направлением стало использование штаммов эндофитных бактерий, обладающих комплексом свойств, направленных на улучшение роста растений и увеличение поглощения ими ионов кадмия из почвы. Например, известны штаммы бактерий рр. *Burkholderia*, *Pseudomonas*, *Pantoea* и *Herbaspirillum*, толерантные к кадмию и продуцирующие гидроксаматные сидерофоры (32,40–91,49%), хелатирующие ионы токсичного металла в почве. Кроме того, они способны оказывать положительное влияние на рост растений за счёт синтеза индолилуксусной кислоты, 1-аминоциклопропан-1-карбоксилатдезаминазы, солюбилизации фосфора в почве, фиксации азота [70].

Экономически эффективным вариантом восстановления загрязнённой кадмием почвы является использование органических добавок. Среди них навоз животных, опилки, биоуголь, рисовая шелуха, снижающие биодоступность кадмия и его поглощение растениями за счёт процессов адсорбции и комплексообразования. Однако необходимо учитывать, что некоторые из них могут также являться дополнительным источником кадмия, в связи с чем необходим контроль за уровнем токсичного металла в этих добавках [71].

#### Агрономические методы снижения поглощения кадмия сельскохозяйственными культурами

Получение растениеводческой продукции с низким содержанием кадмия может значительно уменьшить воздействие данного металла на организм человека. Для снижения поглощения кадмия сельскохозяйственными культурами используются различные методы. Среди них применение различных биопрепаратов и агрохимикатов для повышения устойчивости растений к кадмиевому стрессу. На примере эндофитных штаммов бактерий *Bacillus subtilis* показана эффективность обработки семян растений *Sinapis alba* L. в снижении развития окислительного стресса, вызванного кадмием [72]. Показано, что в присутствии кадмия у растений пшеницы, семена которых инокулированы *B. subtilis*, повышается активность каталазы и пероксида-

зы, уменьшается интенсивность перекисного окисления липидов, увеличивается содержание непротеиноновых тиолов; уменьшается накопление кадмия в побегах [73]. Описаны арбускулярные микоризные грибы, вступающие в симбиотические отношения с корнями растений и тем самым увеличивающие их способность к поглощению питательных веществ, уменьшая при этом поглощение кадмия из почвы [74].

Отмечается важность кремниевого питания, которое может значительно снизить токсичность кадмия [75]. Конкуренцию при поглощении кадмия корнями растений могут составить органические удобрения, являющиеся источниками элементов питания [71]. Снизить биодоступность кадмия в почве возможно посредством известкования кислых почв [76].

Отмечается возможность повышения устойчивости растений к кадмиевому стрессу за счёт предварительной обработки семян различными видами излучения (He-Ne, микроволновое). На примере пшеницы были проведены эксперименты с применением лазера и микроволн для увеличения устойчивости растений к кадмию [77].

Относительно новым подходом, позволяющим повысить безопасность растениеводческой продукции, считаются системы совмещения сельскохозяйственных культур с гипераккумуляторами (*Pontederia cordata* и *Canna indica*, *Sedum plumbizincicola* и *Zea mays*) [78, 79].

Использование сортов с низким уровнем накопления кадмия – ещё одна стратегия снижения поглощения данного токсиканта сельскохозяйственными культурами. В настоящее время активно разрабатываются программы селекции различных культур с низким уровнем накопления кадмия, включая пшеницу, подсолнечник, рис и сою [80]. Предложены схемы клеточной селекции стресс-толерантных к кадмию сортов ячменя, обеспечивающих сокращение потерь урожая и противодействие биоаккумуляции ионов токсичного металла в зерне [81].

Для сортов с высоким содержанием кадмия альтернативой снижению его накопления становятся молекулярно-генетические технологии [82]. В настоящее время обнаружен ряд генов, отвечающих за толерантность растений к кадмию (OSISAP1, Os HsfA4a, ricMT, rgMTOc HsfA4a, ricMT, rgMT) [83].

Показана возможность влияния на мобильность и биодоступность кадмия при вы-

ращивании риса путём управления водными ресурсами. Так, при аэробном культивировании риса обнаружены значительно более высокие концентрации кадмия в зерне, чем при затопленном культивировании в постмуссонных испытаниях [84].

### Заключение

Изучение распространения кадмия в ОС имеет большое значение в оценке риска для здоровья населения и охраны ОС. Попадание кадмия в пищевые цепи связано как с антропогенными, так и естественными процессами. В связи с канцерогенным действием необходимо обратить внимание на ограничение выбросов кадмия в атмосферу, разработку экологически безопасных методов производства и использования кадмия.

Поглощение и накопление кадмия растениями, в частности, сельскохозяйственного назначения, приводит к повышению рисков попадания его в организм человека. Для предотвращения долгосрочного воздействия кадмия на человека необходимо контролировать его содержание не только в продуктах питания, но и объектах ОС; разрабатывать стратегии по снижению его содержания в ОС. Положительную роль в сокращении содержания кадмия в атмосфере и почве играет растительность, и, в первую очередь, травянистые растения, которые способны в процессе транслокации не только его удалять, но и способствовать восстановлению потенциального плодородия почв.

### References

- Maddala N.R., Kakarla D., Garcia L.Z., Chakraborty S., Venkateswarlu K., Megharaj M. Cocoa-laden cadmium threatens human health and cacao economy: A critical view // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 720. Article No. 137645. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137645
- Satarug S., Vesey D.A., Gobe G.C., Phelps K.R. Estimation of health risks associated with dietary cadmium exposure // *Arch. Toxicol.* 2023. V. 97. No. 2. P. 329–358. doi: 10.1007/s00204-022-03432-w
- State Report “On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2022” [Internet resource] <https://2022.ecology-gosdoklad.ru/> (Accessed: 11.06.2024)
- Elinder C.G. Cadmium: uses, occurrence, and intake // *Cadmium and Health: A toxicological and epidemiological appraisal* / Eds. L. T. Friberg, C.G. Elinder, T. Kjellstrom, G.F. Nordberg. V. 1. CRC Press, 1986. P. 23–64. doi: 10.1201/9780429260605
- Ober J.A. Mineral commodity summaries 2016. US Geological Survey, 2016. 202 p. doi: 10.3133/70170140
- Vilk M.F., Aksenov V.A., Yudaeva O.S., Prostopolotova V.B., Ovanesova E.A. Technical and operational methods to ensure environmental and toxicological safety of traction motors of railway rolling stock // *Security Problems of the Russian Society.* 2017. V. 4. P. 96–107 (in Russian).
- Vinogradova A.A. Lead and cadmium fluxes from atmosphere onto the surface in European Russia – from EMEP data // *International Journal of Applied and Fundamental Research.* 2015. No. 12. P. 111–115 (in Russian).
- Kozub S.N. Analysis of current state and choice of raw material of secondary cadmium technology // *Technology Audit and Production Reserves.* 2015. V. 1. No. 4. P. 37–41 (in Russian). doi: 10.15587/2312-8372.2015.38113
- Tuhtamisheva D.Yu., Hesenov A.U., Rashidova N.T. Modern ways to protect metal from corrosion // *Educational Research in Universal Sciences.* 2024. V. 3. Special No. 2. P. 641–644 (in Russian).
- Pelyasova D.A., Lwin Ko Ko, Kvasnikov M.Yu. Pigmented cadmium-polymer coatings // *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii.* 2018. V. 32. No. 6. P. 138–140 (in Russian).
- Akhmetzyanov B.N., Vasilieva A.V., Getman A.A. The use of cadmium-based alloys // *Metallurgiya mashinostroeniya.* 2020. No. 4. P. 32–33 (in Russian).
- Turner A. Cadmium pigments in consumer products and their health risks // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 657. P. 1409–1418. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.096
- Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L., Vikent'ev I.V., Aristov V.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu. Mineral resources of high-tech metals in Russia: state of the art and outlook // *Geol. Ore Deposits.* 2016. V. 58. No. 2. P. 83–103. doi: 10.1134/S1075701516020021
- Brunner P.H., Rechberger H. Waste to energy – key element for sustainable waste management // *Waste Manag.* 2015. V. 37. P. 3–12. doi: 10.1016/j.wasman.2014.02.003
- Yuan Z., Luo T., Liu X., Hua H., Zhuang Yu., Zhang X., Zhang L., Zhang Y., Xu W., Ren J. Tracing anthropogenic cadmium emissions: From sources to pollution // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 676. P. 87–96. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.250
- Golovaty S.E., Savchenko S.V., Samsuk E.A. Cadmium, zinc and lead in soils in the zone of influence of the industrial enterprises // *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2017. No. 4. P. 70–80 (in Russian).
- Nduka J.K., Kelle H.I., Amuka J.O. Health risk assessment of cadmium, chromium and nickel from car paint dust from used automobiles at auto-panel workshops in Nigeria // *Toxicol. Rep.* 2019. V. 6. P. 449–456. doi: 10.1016/j.toxrep.2019.05.007
- Es'kov E.K., Es'kova M.D. Accumulation of lead and cadmium by different plant organs depending on their

- distance from the highway // *Agrochemistry*. 2013. No. 5. P. 81–85 (in Russian).
19. Elehinafe F.B., Mamudu A.O., Okedere O.B., Ibitoye A. Risk assessment of chromium and cadmium emissions from the consumption of premium motor spirit (PMS) and automotive gas oil (AGO) in Nigeria // *Heliyon*. 2020. V. 6. No. 11. Article No. e05301. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05301
20. Kakareka S.V., Salivonchik S.V. Forecasting heavy metal pollution of soils in an administrative district of Belarus // *Geografiya i prirodnye resursy*. 2017. No. 3. P. 179–188 (in Russian). doi: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-3(179-188)
21. Chetyerbotskiy V.A., Chetyerbotskiy A.N. Estimation of cadmium contamination of agrocenosis by mathematical modeling methods // *Agrochemistry*. 2020. No. 4. P. 85–93 (in Russian). doi: 10.31857/S0002188120040031
22. Salmanzadeh M., Hartland A., Stirling C.H., Balks M.R., Schipper L.A., Joshi C., George E. Isotope tracing of long-term cadmium fluxes in an agricultural soil // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. No. 13. P. 7369–7377. doi: 10.1021/acs.est.7b00858
23. Defarge N., Spiroux de Vendômois J., Séralini G.E. Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides // *Toxicol. Rep.* 2018. V. 5. P. 156–163. doi: 10.1016/j.toxrep.2017.12.025
24. Jacques M.T., Bornhorst J., Soares M.V., Schwerttle T., Garcia S., Ávila D.S. Reprotoxicity of glyphosate-based formulation in *Caenorhabditis elegans* is not due to the active ingredient only // *Environ. Pollut.* 2019. V. 252 (Pt B). P. 1854–1862. doi: 10.1016/j.envpol.2019.06.099
25. Shupletsova O.N., Tovstik E.V. Accumulation of cadmium and zinc in barley regenerants on a provocative soil background with cadmium // *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2021. V. 182. No. 4. P. 117–125 (in Russian). doi: 10.30901/2227-8834-2021-4-117-125
26. Tuktarova Yu.V., Farkhutdinov R.G. Bioaccumulation of heavy metals in the soil-plant-bee-honey trophic chain // *Agrochemistry*. 2013. No. 6. P. 78–82.
27. Liu G., Xue W., Wang J., Liu X. Transport behavior of variable charge soil particle size fractions and their influence on cadmium transport in saturated porous media // *Geoderma*. 2019. V. 337. P. 945–955. doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.016
28. Kaloev B.S., Kumsiev E.I. Monitoring of heavy metals in the system “soil–plant food” // *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. V. 51. No. 4. P. 170–174 (in Russian).
29. Fajzullina R.A., Mal'cev S.V. Metabolism of trace elements and diseases of the digestive system // *Diseases of the stomach and duodenum in children* / Eds. S.V. Bel'mer, A.Yu. Razumovskiy, A.I. Havkin. Moskva: ID "MED-PRAKTIKA-M", 2017. P. 218–253 (in Russian).
30. Tinkov A.A., Gritsenko V.A., Skalnaya M.G., Cherkasov S.V., Aaseth J., Skalny A.V. Gut as a target for cadmium toxicity // *Environ. Pollut.* 2018. V. 235. P. 429–434. doi: 10.1016/j.envpol.2017.12.114
31. Akhpolova V.O., Brin V.B. Actual concepts of heavy metals' kinetics and pathogenesis of toxicity // *Journal of New Medical Technologies*. 2020. V. 27. No. 1. P. 55–61 (in Russian). doi: 10.24411/1609-2163-2020-16578
32. Andjelkovic M., Buha Djordjevic A., Antonijevic E., Antonijevic B., Stanic M., Kotur-Stevuljevic J., Spasojevic-Kalimanovska V., Jovanovic M., Boricic N., Wallace D., Bulat Z. Toxic effect of acute cadmium and lead exposure in rat blood, liver, and kidney // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2019. V. 16. No. 2. Article No. 274. doi: 10.3390/ijerph16020274
33. Fazlieva A.S., Daukaev R.A., Karimov D.O. Influence of cadmium on population health and methods for preventing its toxic effects // *Occupational Health and Human Ecology*. 2022. V. 1. P. 220–235 (in Russian). doi: 10.24411/2411-3794-2022-10115
34. Aoshima K. *Itai-itai* disease: Renal tubular osteomalacia induced by environmental exposure to cadmium – historical review and perspectives // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2016. V. 62. No. 4. P. 319–326. doi: 10.1080/00380768.2016.1159116
35. Lastkov D.O., Dubovaya A.V., Ezheleva M.I., Ostrenko V.V. Assessment of biomarkers as indicators of heavy metals' influence on the health of the adult population // *University Clinic*. 2023. V. 3. No. 44. P. 5–12 (in Russian).
36. Suhani I., Sahab S., Srivastava V., Singh R.P. Impact of cadmium pollution on food safety and human health // *Curr. Opin. Toxicol.* 2021. V. 27. P. 1–7. doi: 10.1016/j.cotox.2021.04.004
37. Rakhymgozhina A., Atabayeva S., Shoinbekova S., Asrandina S., Doktyrbay G. Effect of plant growth regulators on rice plants (*Oryza sativa* L.) growth under cadmium stress // *BIO Web Conf.* 2024. V. 100. Article No. 02001. doi: 10.1051/bioconf/202410002001
38. Khan S., Naushad M., Lima E.C., Zhang S., Shaheen S.M., Rinklebe J. Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies – A review // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 417. Article No. 126039. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126039
39. Ediene V., Umoetok S. Concentration of heavy metals in soils at the municipal dumpsite in Calabar metropolis // *Asian Journal of Environment & Ecology*. 2017. V. 3. No. 2. P. 1–11. doi: 10.9734/AJEE/2017/34236
40. Selyukova S.V. Heavy metals concentration in organic fertilizers // *Agrohimicheskij vestnik*. 2016. No. 5. P. 47–51 (in Russian).
41. Matinyan Ya.N., Reymann K., Bakhmatova K.A., Rusakov A.V. The background concentrations of heavy metals and As in arable soils of the Baltic region // *Biological Communications*. 2007. No. 3. P. 123–134 (in Russian).
42. Zabashta A.V., Zabashta N.N., Lisovitskaya E.P. Accumulation of heavy metals in soils of foothal areas of Krasnodar Kray // *Vestnik of Kazan State Agrarian*

- University. 2019. V. 14. No. 1. P. 22–26 (in Russian). doi: 10.12737/article\_5ccedba6e0c8c9.68580698
43. Tovstik E.V., Kazakova A.A. The influence of soil acidity on the migration of zinc and cadmium in the soil-plant system // *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2019. No. 50–1. P. 40–43 (in Russian). doi: 10.18411/lj-05-2019-12
44. Evtushkova E.P., Soloshenko A.I. Monitoring of agrochemical indicators of fertility of arable soils of the Tyumen region // *International Agricultural Journal*. 2023. V. 66. No. 4. P. 1225–1249 (in Russian). doi: 10.55186/25876740\_2023\_7\_4\_14
45. Komarov V.I., Selivanov O.G., Martsev A.A., Podoletc A.A., Lukyanov S.N. Heavy metals contamination in arable horizon of soils of agricultural appointment of the Vladimir region // *Agrochemistry*. 2019. No. 12. P. 75–82 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119100089
46. Ermakova S.V. Heavy metal content in soils of agricultural land in south-eastern Kamchatka on the territory of the Yelizovsky district // *Natural resources, their current state, protection, commercial and technical utilization: materialy Nacional'noy (vserossiyskoy) nauchno-prakticheskoy konferencii. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KamchatGTU*, 2022. P. 169–172 (in Russian).
47. Zhao C., Ren S., Zuo Q., Wang S., Zhou Y., Liu W., Liang S. Effect of nanohydroxyapatite on cadmium leaching and environmental risks under simulated acid rain // *Sci. Total Environ*. 2018. V. 627. P. 553–560. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.267
48. Slabko Y.I., Lopatina A.A. Cadmium accumulation in soil and plants of soybean under the influence of mineral fertilizers // *The Bulletin of KrasGAU*. 2016. No. 2. P. 19–23 (in Russian).
49. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N., Kantor G.Ya. Prospects for using phosphate rock enrichment tailings as fertilizers for organic farming // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 160–166 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-160-166
50. Kuzmin S.V., Rusakov V.N., Setko A.G., Sinit-syna O.O. Toxicological and hygienic aspects of the dietary cadmium intake and its human health effects: a literature review // *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2024. No. 32 (7). P. 49–57 (in Russian). doi: 10.35627/2219-5238/2023-32-7-49-57
51. Schaefer H.R., Dennis S., Fitzpatrick S. Cadmium: Mitigation strategies to reduce dietary exposure // *J. Food Sci*. 2020. V. 85. No. 2. P. 260–267. doi: 10.1111/1750-3841.14997
52. Kulikova E.G., Blinokhvatova Yu.V. Safety and quality of food products, food raw materials and feed in conditions of intensive production technologies // *Surskiy vestnik*. 2021. No. 1. P. 15–18 (in Russian). doi: 10.36461/2619-1202\_2021\_13\_01\_003
53. Song Y., Wang Y., Mao W., Sui H., Yong L., Yang D., Jiang D., Zhang L., Gong Y. Dietary cadmium exposure assessment among the Chinese population // *PloS One*. 2017. V. 12. No. 5. Article No. e0177978. doi: 10.1371/journal.pone.0177978
54. Panov A.V., Trapeznikov A.V., Korzhavin A.V., Sidorova E.V., Korneev Yu.N. Heavy metals and arsenic in foodstuffs in the vicinity of industrial enterprises and nuclear power plant // *Gigiena i sanitariya*. 2023. V. 102. No. 1. P. 70–76 (in Russian). doi: 10.47470/0016-9900-2023-102-1-70-76
55. Shur P.Z., Fokin V.A., Novosyolov V.G. On the issue of assessing the acceptable daily intake of cadmium with food // *Zdorov'e naseleniya i sreda obitaniya*. 2015. No. 12 (273). P. 30–32 (in Russian).
56. Han X.Q., Xiao X.Y., Guo Z.H., Xie Y.H., Zhu H.W., Peng C., Liang Y.Q. Release of cadmium in contaminated paddy soil amended with NPK fertilizer and lime under water management // *Ecotoxicol. Environ. Saf*. 2018. V. 159. P. 38–45. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.04.049
57. Koptsik G.N. Modern approaches to remediation of heavy metal polluted soils: a review // *Eurasian Soil Sc*. 2014. V. 47. No. 7. P. 707–722. doi: 10.1134/S1064229314070072
58. Tao Q., Zhao J., Li J., Liu Y., Luo J., Yuan S., Li B., Li Q., Xu Q., Yu X., Huang H., Li T., Wang C. Unique root exudate tartaric acid enhanced cadmium mobilization and uptake in Cd-hyperaccumulator *Sedum alfredii* // *J. Hazard. Mater*. 2020. V. 383. Article No. 121177. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121177
59. Wen J., Zhou J., Zhang R., Ren W., Zhao J., Cai D. Current advances of the valorization technologies for heavy metal containing hyperaccumulators // *Ind. Crop. Prod*. 2024. V. 209. No. 1. Article No. 118051. doi: 10.1016/j.indcrop.2024.118051
60. Liu S., Ali S., Yang R., Tao J., Ren B. A newly discovered Cd-hyperaccumulator *Lantana camara* L. // *J. Hazard. Mater*. 2019. V. 371. P. 233–242. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.016
61. Dhaliwal S.S., Sharma V., Kaur J., Shukla A.K., Singh J., Singh P. Cadmium phytoremediation potential of *Brassica* genotypes grown in Cd spiked Loamy sand soils: Accumulation and tolerance // *Chemosphere*. 2022. V. 302. Article No. 134842. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134842
62. Frunze O.V. Sorption capacity of some types of ornamental herbaceous plants under conditions of controlled soil contamination with cadmium ions // *Bulletin of Donetsk National University. Series A: Natural Sciences*. 2023. No. 1. P. 105–111 (in Russian).
63. Mench M., Tancogne J., Gomez A., Juste C. Cadmium bioavailability to *Nicotiana tabacum* L., *Nicotiana rustica* L., and *Zea mays* L. grown in soil amended or not amended with cadmium nitrate // *Biol. Fert. Soils*. 1989. V. 8. P. 48–53. doi: 10.1007/BF00260515
64. Li C., Zhang C., Yu T., Liu X., Yang Y., Hou Q., Yang Z., Ma X., Wang L. Use of artificial neural network to evaluate cadmium contamination in farmland soils in a karst area with naturally high background values //

- Environ. Pollut. 2022. V. 304. Article No. 119234. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119234
65. Pinto E., Cruz M., Ramos P., Santos A., Almeida A. Metals transfer from tobacco to cigarette smoke: Evidences in smokers' lung tissue // J. Hazard. Mater. 2017. V. 325. P. 31–35. doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.069
66. Hakimova L.R., Blagova D.K., Lavina A.M., Serbaeva E.R., Sadykova L.R., Vershinina Z.R., Bajmiev Al.Kh. Creation of microbial-plant communities for phytoremediation // Doklady Bashkirskogo Universiteta. 2018. V. 3. No. 4. P. 473–476 (in Russian).
67. Vershinina Z.R., Maslennikova D.R., Chubukova O.V., Khakimova L.R., Fedyaev V.V. Contribution of artificially synthesized phytonelatin, encoded by the gene *PPH6HIS* to increase the phytoremediative qualities of tobacco plants // Russ. J. Plant Physiol. 2022. V. 69. No. 4. Article No. 71. doi: 10.1134/S1021443722040185
68. Meng L., Huang T., Shi J., Chen J., Zhong F., Wu L., Xu J. Decreasing cadmium uptake of rice (*Oryza sativa* L.) in the cadmium-contaminated paddy field through different cultivars coupling with appropriate soil amendments // J. Soils Sediments. 2019. V. 19. P. 1788–1798. doi: 10.1007/s11368-018-2186-x
69. Yang Q., Yang C., Yu H., Zhao Z., Bai Z. The addition of degradable chelating agents enhances maize phytoremediation efficiency in Cd-contaminated soils // Chemosphere. 2021. V. 269. Article No. 129373. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129373
70. Li Y., Wei S., Chen X., Dong Y., Zeng M., Yan C., Hou L., Jiao R. Isolation of cadmium-resistance and siderophore-producing endophytic bacteria and their potential use for soil cadmium remediation // Heliyon. 2023. V. 9. No. 7. Article No. e17661. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17661
71. Khan M.A., Khan S., Khan A., Alam M. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments // Sci. Total Environ. 2017. V. 601–602. P. 1591–1605. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.030
72. Kuramshina Z.M., Smirnova Y.V., Khairullin R.M. Cadmium and nickel toxicity for *Sinapis alba* plants inoculated with endophytic strains of *Bacillus subtilis* // Russ. J. Plant Physiol. 2018. V. 65. No. 2. P. 269–277. doi: 10.1134/S1021443718010077
73. Kuramshina Z.M., Smirnova Y.V., Khairullin R.M. Increasing *Triticum aestivum* tolerance to cadmium stress through endophytic strains of *Bacillus subtilis* // Russ. J. Plant Physiol. 2016. V. 63. No. 5. P. 636–644. doi: 10.1134/S102144371605008
74. Hamid Y., Tang L., Sohail M.I., Cao X., Hussain B., Aziz M.Z., Usman M., He Z., Yang X. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain // Sci. Total Environ. 2019. V. 660. P. 80–96. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.419
75. Sarwar N., Saifullah, Malhi S.S., Zia M.H., Naeem A., Bibi S., Farid G. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants // J. Sci. Food Agric. 2010. V. 90. No. 6. P. 925–937. doi: 10.1002/jsfa.3916
76. Chen H., Zhang W., Yang X., Wang P., McGrath S.P., Zhao F.J. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain // Chemosphere. 2018. V. 207. P. 699–707. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.05.143
77. Rizwan M., Ali S., Abbas T., Zia-Ur-Rehman M., Hannan F., Keller C., Al-Wabel M.I., Ok Y.S. Cadmium minimization in wheat: a critical review // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2016. V. 130. P. 43–53. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.04.001
78. Xiang H., Lan N., Wang F., Zhao B., Wei H., Zhang J. An effective planting model to decrease cadmium accumulation in rice grain and plant: Intercropping rice with wetland plants // Pedosphere. 2023. V. 33. No. 2. P. 355–364. doi: 10.1016/j.pedsph.2022.06.054
79. Deng L., Li Z., Wang J., Liu H., Li N., Wu L., Hu P., Luo Y., Christie P. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies // Int. J. Phytoremediation. 2016. V. 18. No. 2. P. 134–140. doi: 10.1080/15226514.2015.1058328
80. Grant C.A., Clarke J.M., Duguid S., Chaney R.L. Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation // Sci. Total Environ. 2008. V. 390. No. 2–3. P. 301–310. doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.10.038
81. Shirokikh I.G., Shupletsova O.N., Tovstik E.V., Ogorodnikova S.Yu., Nazarova Ya.I., Berezin G.I. Comprehensive assessment of barley plants regenerated from resistant to cadmium callus lines // Agricultural Science Euro-North-East. 2018. No. 4 (65). P. 19–29 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2018.65.4.19-29
82. Hussain B., Umer M.J., Li J., Ma Y., Abbas Y., Ashraf M.N., Tahir N., Ullah A., Gogoi N., Farooq M. Strategies for reducing cadmium accumulation in rice grains // J. Clean. Prod. 2021. V. 286. Article No. 125557. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125557
83. Sebastian A., Prasad M.N.V. Cadmium minimization in rice. A review // Agron. Sustain. Dev. 2014. V. 34. P. 155–173. doi: 10.1007/s13593-013-0152-y
84. Majumder S., Powell M.A., Biswas P.K., Banik P. The role of agronomic factors (rice cultivation practices and soil amendments) on Arsenic fractionation: A strategy to minimise Arsenic uptake by rice, with some observations related to cadmium // Catena. 2021. V. 206. Article No. 105556. doi: 10.1016/j.catena.2021.105556

## Химический состав и сорбционная активность сапропелей (обзор)

© 2024. М. Л. Сазанова<sup>1</sup>, к. б. н., доцент, н. с.,  
А. В. Сазанов<sup>2</sup>, к. б. н., и. о. зав. кафедрой, И. А. Жуйкова<sup>2</sup>, к. г. н., доцент,  
Л. В. Тугаринов<sup>3</sup>, директор по науке,

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

<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>3</sup>ООО «ГлавАгроСнаб»,  
656067, Россия, г. Барнаул, ул. Попова, д. 208,  
e-mail: sazanova.m.l@ib.komisc.ru, usr11759@vyatsu.ru

В последние годы остро стоит вопрос об удалении из окружающей среды либо снижении токсичности поступающих загрязнителей в соответствии с принципами «зелёной химии». «Зелёная утилизация» токсикантов с помощью сорбентов подразумевает использование возобновляемых природных сорбентов с низкой себестоимостью и высокой эффективностью, а также возможность повторного использования сырья. Данным принципам вполне соответствуют пресноводные сапропели. Химический состав сапропелей включает органические и неорганические вещества, преобладание минеральной части определяет тип сапропеля. Состав минеральной части зависит от географического положения, геохимического состава отложений водоёма, химического состава воды, поступающей в озёрную толщу и других факторов. Общее содержание N, P, K, Ca и илстой фракции обуславливает агрохимическую эффективность сапропелей; известковистые сапропели характеризуются наибольшей концентрацией макроэлементов, а органо-кремнезёмистые – наибольшей концентрацией микроэлементов. Сапропели с невысоким содержанием P и K могут быть использованы для производства гуминовых препаратов, мелиорантов и препаратов для детоксикации, ремедиации и рекультивации деградированных и загрязнённых почв. Органическая составляющая сапропелей включает липиды, простые и сложные эфиры, карбоновые кислоты, стерины, спирты, кетоны, пигменты, углеводороды, порфирины, витамины, ферменты и др., что активно используется в бальнеотерапии. Наличие на поверхности гуминовых веществ в составе сапропелей большого количества азот- и кислородсодержащих функциональных групп обуславливает высокую сорбционную способность. Синтезированные с использованием сапропеля сорбенты эффективны в очистке сточных вод/водных поверхностей от нефти и нефтепродуктов, фенола и других органических загрязнителей, тяжёлых металлов, фторидов, красителей. Широкое распространение сапропелей в пределах водоёмов умеренного пояса, низкая стоимость, достаточно простая технология добычи и применения, наряду с высокими сорбционными свойствами делают перспективным использование этого природного сырья в качестве сорбентов / для производства сорбентов для очищения водоёмов, сточных вод и почв от тяжёлых металлов и нефтяных углеводородов, ремедиации загрязнённых нефтепродуктами и радионуклидами почв.

**Ключевые слова:** сапропели, сорбенты, гуминовые кислоты, фульвокислоты, «зелёная утилизация», ремедиация.

## Chemical composition and sorption activity of sapropels: a review

© 2024. M. L. Sazanova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-3492-8395, A. V. Sazanov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6934-3330,  
I. A. Zhuikova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7855-604X, L. V. Tugarinov<sup>3</sup> ORCID: 0009-0001-5523-3683

<sup>1</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,

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

<sup>2</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>3</sup>GlavAgroSnab Ltd,

208, Popova St., Barnaul, Russia, 656067,

e-mail: sazanova.m.l@ib.komisc.ru, usr11759@vyatsu.ru

Recently the removing from the environment or reducing the toxicity of pollutants in accordance with the principles of “green chemistry” is acute. “Green utilization” of toxicants by means of sorbents implies the use of renewable natural sorbents with low cost and high efficiency, as well as the possibility of raw materials reuse. Freshwater sapropels meet these principles quite well. The sapropels include organic and inorganic substances, the predominance of the mineral part determines the sapropel type. The composition of the mineral part depends on the geographical location, geochemical composition of the reservoir sediments, chemical composition of water entering the lake bed and other factors. The N, P, K, Ca and silt fraction total content determines the agrochemical efficiency of sapropels; calcareous sapropels are characterized by the highest concentration of macroelements, and organic-silica sapropels – by the highest concentration of trace elements. Sapropels with P and K low content can be used for production of humic preparations, ameliorants and preparations for detoxification, remediation and recultivation of degraded and polluted soils. The organic component of sapropels includes lipids, simple and esters, carboxylic acids, sterols, alcohols, ketones, pigments, hydrocarbons, porphyrins, vitamins, enzymes, etc., which is actively used in balneotherapy. The presence of a large number of nitrogen- and oxygen-containing functional groups on the surface of humic substances in sapropel is responsible for high sorption capacity. The sorbents synthesized using sapropel are effective in wastewater/water surface treatment from oil and oil products, phenol and other organic pollutants, heavy metals, fluorides, dyes. The wide distribution of sapropels within the temperate zone water bodies, low cost, simple enough technology of extraction and application, along with high sorption properties make it promising to use this natural raw material as sorbents / for the production of sorbents for purification of water bodies, wastewater and soils from heavy metals and petroleum hydrocarbons, remediation of soils contaminated with petroleum products and radionuclides.

**Keywords:** sapropel, sorbent, humic acids, fulvic acids, “green utilization”, remediation.

В связи с поступлением в окружающую среду большого количества загрязнителей остро встаёт вопрос об их удалении либо снижении токсичности уже поступивших в биосферу. С этой задачей неплохо справляются различные природные и искусственные сорбенты; в пользу первых свидетельствует их соответствие принципам «зелёной утилизации»: низкая себестоимость, высокая эффективность, возобновляемость, возможность использования в качестве мелиорантов и т. п. [1]. В настоящее время известно достаточно большое количество природных сорбентов, к которым относят горные породы и минералы, обладающие высокими адсорбционными и (или) ионообменными свойствами: природные цеолиты, бентонитовые и палыгорскитовые глины, диатомиты, сапропели, опоки, трепелы и др. Благодаря высокой пористости, молекулярно-ситовым свойствам и кислотоустойчивости их используют в промышленности в качестве осушителей и очистителей промышленных газов и вод; в сельском хозяйстве в качестве биостимулирующих кормовых добавок, кондиционирующих материалов при подготовке удобрений, пролонгаторов и т. д. Активно используются сорбенты и в природоохранных мероприятиях (очистка промышленных газов, дезактивация почв от токсичных примесей, очистка водоёмов от загрязнителей, рекультивация и др.) [2–5].

Образовавшиеся на дне озёр в течение тысяч лет в результате микробиологических, биохимических и механических процессов органо-минеральные отложения, содержащие свыше 15 % (по массе) органических веществ, называются сапропелями [6–9]. В литературе

также можно встретить название гиттия (шв. *gyttja*, букв. иловая грязь) [10–15], имеет то же значение – «ил», «тина», «вещество, образующееся на дне водоёмов». Наиболее интенсивное образование и накопление сапропеля характерно для умеренных климатических зон Евразии и Северной Америки [7, 13]. Так, в России запасы сапропеля оцениваются в 250 млрд м<sup>3</sup> [9], в Белоруссии – 4 млрд м<sup>3</sup> [16], в Литве – 1,5 млрд м<sup>3</sup> [17, 18], в Латвии – 0,7–2 млрд м<sup>3</sup> [15; 19], в Украине – 86 млн т [20]; запасы сапропеля в Западной Европе (Великобритания, Германия, Польша, Румыния, Франция, скандинавские страны) существенно истощены [8]. Изучались также сапропелевые отложения в озёрах Африки [21], а также озёрах на месте закрытых шахт по разработке бурого угля и глины [12].

Цель работы – систематизировать и критически оценить мировой опыт и перспективные научные разработки в сфере применения сапропелей и продуктов на их основе в качестве сорбентов, в том числе для ремедиации загрязнённых сред.

### Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор, направленный на структурирование, критический анализ и обобщение опубликованных данных по рассматриваемой проблеме. Базу обзорной статьи составляют результаты научных исследований, посвящённых вопросам химического строения и сорбционных свойств сапропелей, за период с 2000 по 2024 гг. Для поиска источников научной и технической информации использовали сервисы PubMed, Scopus, Web

of Science, Google Scholar, eLIBRARY, Академия Google, ИС «Поисковая платформа» Роспатента. Подбор публикаций проводили по таким ключевым словам (в русскоязычном и англоязычном вариантах), как сапропель, донные отложения, сорбент, фульвокислоты, гуминовые кислоты, «зелёная утилизация», а также по ключевым словам из научных статей аналогичной тематики.

### Химический состав сапропелей

Сапропели представляют собой сложный органоминеральный комплекс, формирующийся под влиянием многих факторов, поэтому химический состав сапропеля зависит от условий формирования и изначальной совокупности органических и минеральных компонентов. Согласно [7], классификация сапропелей должна строиться с учётом содержания органического вещества (ОВ), а также состава минеральных и органических компонентов, однако существующие классификации не отличаются достаточной полнотой и универсальностью. Наиболее полной считается генетическая классификация сапропелей с учётом содержания ОВ, степени его разложения, минеральной составляющей, содержания остатков микроорганизмов [6]. Промышленно-генетическая классификация сапропелей строится с учётом их зольности [22]. Преобладание минеральной составляющей определяет железистый, кремнезёмистый (25–45% кремнезёма), карбонатный/известковистый (30–60% карбоната кальция), органический (50–90% ОВ) типы сапропеля; существует несколько видов каждого типа; основной тип определяется биологическим и оксидным содержанием [23, 24]. В пределах одного водоёма, как правило, представлены разные типы сапропеля. Например, в озере Кирек (Томская область) на мелководных участках сформировался известковистый сапропель за счёт разложения биомассы макрофитов, на больших глубинах – органо-железистый сапропель за счёт отмирания биомассы фито- и зоопланктона, на переходных глубинах (3,5–4,5 м) – сапропель смешанного генезиса [25].

Большое количество работ посвящено изучению содержания макро- и микроэлементов в составе сапропелей. Элементный состав сапропелей включает все незаменимые макро- и микроэлементы: N, P, K, S, Ca, Fe, Mg, Cu, Mn, Na, Zn, Co, B, I и др. [13, 14, 23, 25–39]. Согласно [34], состав минеральной части пре-

сноводных сапропелей находится в прямой зависимости от географического положения и геохимического состава отложений региона; условий формирования и возраста озёрной толщи; химического состава воды, поступающей в озёрную котловину; химического состава гидробионтов и околотоводных организмов.

Согласно [40], общее содержание N, P, K, равно как содержание Ca и илистой фракции, обуславливает агрохимическую эффективность сапропелей. Сравнительно невысокое содержание P и K в сапропелях ряда месторождений [30, 37, 39] снижает эффективность удобрений на основе нативного сапропеля; для компенсации дефицита органогенов рекомендуется смешивание сапропеля с навозом или обогащение минеральными удобрениями [9]. Другим вариантом является производство гуминовых препаратов, которые в значительной степени наследуют свойства гуминовой фракции сапропелей [41], являются нетоксичными по результатам биотестирования [41, 42], и могут использоваться в качестве стимуляторов роста растений [43, 44], а также мелиорантов и препаратов для детоксикации, ремедиации и рекультивации деградированных и загрязнённых почв [2, 3, 45, 46–48].

Установлено, что содержание химических элементов в сапропелях различного типа отличается как от почвенных кларков, так и от среднего по сапропелям в целом. Так, известковистые сапропели характеризуются наибольшей концентрацией макроэлементов, а органо-кремнезёмистые сапропели – наибольшей концентрацией микроэлементов [14], что важно учитывать при производстве удобрений, кормовых добавок и др. По данным [34], концентрация Co, B, Cr, Mo/Zn/Cu и V в широко распространённых органо-кремнезёмистых сапропелях, соответственно, в 4, 2–7, 2–5, 2–4 и 2 раза выше, чем в среднем в почвах мира, в связи с чем сапропели и продукты на их основе служат источником обогащения кормов микроэлементами [28, 49]. Установлено, что химические элементы относительно равномерно распределены по сапропелевому слою [23, 25, 33, 50]. P, Br, Zn, Ca, Na в составе сапропелей имеют преимущественно «планктонное» происхождение (биогенный вклад 30–100%) [29, 33].

По данным российских исследователей образцов сапропелей из различных месторождений [23, 34, 37–39], содержание тяжёлых металлов (ТМ) находится в нормативных пределах и соответствует требованиям безопасности (ГОСТ 54000-2010 и т.п.). Для Sr

и Ва биогенный вклад оценивается в 30%, для Cd, Cu, K, Mg, Sr в 16–26%, причём по многим элементам, в том числе ТМ (за исключением Mn), планктонный вклад заметно превосходит растительный [29]. Высокое содержание подвижных форм Cd, Sb, Sn, Pb и Zn в верхних горизонтах сапропеля может быть обусловлено антропогенными факторами: лесные пожары, влияние выбросов автотранспорта, ТЭС и др. [23, 25, 33, 36, 51, 52]; кроме того, способность макрофитов аккумулировать ТМ из воды способствует их накоплению в донных отложениях после отмирания растений [53]. Редкоземельные элементы – Sc, Ce, Y, La, Th и др. – накапливаются преимущественно в негидролизуемом остатке [27, 35]. Rb, Sc, Zr, Nb, лантаноиды, Hf и Th в составе сапропеля считаются исключительно терригенными элементами (биогенный вклад <1%) [29; 33].

Основными источниками ОБ сапропелей являются зоо- и фитопланктон, концентрирующие в основном органогены, а также некоторые щелочные, щелочноземельные и халькофильные элементы и перемещающие их в осадки [33]. Методом последовательной экстракции в составе ОБ сапропелей выделяются следующие фракции: кислоторастворимые (карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов); водорастворимые (пектиновые вещества, моно- и дисахариды и др.); битумы, растворимые в спирт-бензольной смеси (липиды, фенолы, соединения пиридинового ряда, алифатические углеводороды и др.); гуминовые и фульвовые кислоты; легкогидролизуемые (полисахариды); трудногидролизуемые (целлюлоза) и негидролизуемый остаток (гумин и нерастворимые минералы) [54]. Более детальный анализ позволяет идентифицировать липиды, простые и сложные эфиры, карбоновые кислоты, стеринны, спирты, кетоны, пигменты, углеводороды, порфирины, витамины (тиамин, рибофлавин, фолиевая кислота, цианкобаламин, токоферол, пиридоксин, аскорбиновая кислота), ферменты (каталаза, пероксидаза, редуктаза, протеаза, уреазы и ксантиноксидаза), антибиотики и др. [26, 28, 32, 55–57]. Особое значение имеют гуминовые вещества, включающие гуминовые, гиматомелановые и фульвокислоты, обогащённые ионизируемыми функциональными группами (карбоксильными и фенольными), содержащие гетероциклический и амидный азот и, как следствие, наиболее реакционно-способные [58].

Фульвокислотная фракция сапропелей имеет невысокую молекулярную массу, со-

держит большое количество кислородсодержащих (карбонильных, карбоксильных) групп. Методом тонкослойной хроматографии в составе ФК были качественно идентифицированы аминокислоты, углеводы, карбоновые кислоты [56]. Фракция карбоновых кислот включает насыщенные монокарбоновые (арахиновая, бегеновая, капроновая, лигноцереновая, миристиновая, пальмитиновая, пировиноградная, стеариновая, церотиновая), ди- и трикарбоновые (адипиновая, азелаиновая, винная, лимонная, малоновая, метилантарная, пимелиновая, щавелевая, яблочная, янтарная), ненасыщенные (линолевая, линоленовая, олеиновая), ароматические (бензойная, ванилиновая, галловая, гентициновая, *n*-кумаровая, салициловая, сиреневая, терефталевая, феруловая, фталевая) кислоты [55, 56, 59]. Углеводный пул состоит из D-глюкозы, D-галактозы, L-рамнозы, арабинозы, ксилозы, лактозы, мальтозы, раффинозы, целлобиозы [54–56], причём планктоногенный сапрпель содержит значительно меньшее количество глюкозы и целлобиозы, чем макрофитогенный [54]. Аминокислотный комплекс представлен глутаминовой кислотой, треонином, лейцином, аспарагиновой кислотой, фенилаланином, тирозином, гистидином, цистеином, изолейцином, лизином, глицином, аспарагином, аргинином, серином, валином, L- $\alpha$ -аланином, глутамином, триптофаном, метионином [28, 32, 55], что указывает на органическую природу азота сапропелей. Концентрация аминокислот зависит от источника и глубины отбора проб сапропеля [28].

Во фракции гуминовых кислот, по результатам термического анализа [60], преобладают алифатические фрагменты по сравнению с циклическими. По данным ИК-спектрограмм для гуминовых кислот характерно наличие групп –ОН, –NH, –C=O, –COOH, в т. ч. связанных межмолекулярными водородными связями, алифатических –CH<sub>2</sub>– и –CH<sub>3</sub> и хиноидных фрагментов, группировок C=C ароматического скелета и многоядерных структур, пептидных связей [56, 60]. Гиматомелановые кислоты сапропелей имеют меньшее значение молекулярной массы, большее содержание алифатических, алициклических и гидроароматических структур, карбоксильных и сложноэфирных групп [56]. Таким образом, согласно современным представлениям [58], гуминовые вещества являются надмолекулярными ансамблями небольших молекул (2–6 кДа), стабилизированных дисперсионными взаимодействиями и водородными связями.

Разнообразие ОВ в составе сапропеля косвенно свидетельствует об активной микробиологической деятельности. В верхнем пятисантиметровом слое в сапропеле снижается количество типичных для продуцентов белково-углеводных соединений; глубже ОВ модифицируются бактериями в анаэробных условиях. Для верхних горизонтов – активных (деятельных) слоёв сапропеля – характерно максимальное обилие аммонифицирующих бактерий, которые участвуют в разложении азотсодержащих органических соединений; с глубиной увеличивается количество сульфатредуцирующих бактерий [50]. В сапропеле сульфатно-солонатоводных водоёмов основной вклад в численность сообщества вносят сульфатредуцирующие и броидильные бактерии [61].

### Сорбционная активность сапропелей

Решению задач снижения потребления природных ресурсов и загрязнения окружающей среды способствует создание инновационных строительных и композиционных материалов с использованием возобновляемого сырья, в частности сапропеля, в качестве связующей основы [62–64], а также сорбентов для очистки от загрязнителей сточных вод и почв [3, 65], нефти и нефтепродуктов от примесей [66], ремедиации загрязнённых нефтепродуктами и радионуклидами почв [2, 45–47]. В отношении достоинств и недостатков сорбентов на основе сапропеля отсутствует единое мнение: с одной стороны указывают на экологическую чистоту, высокую гидрофобность и простоту утилизации отработанного сорбента путём сжигания [3], с другой – отмечают наличие большого количества пыли, минеральных веществ и токсичных органических соединений [67]. Тем не менее, сапропель, наряду с леонардитом и торфом, входит в тройку основных природных источников для промышленного производства гуминовых кислот [2], которые и определяют сорбционные свойства углеродных/углерод-минеральных материалов на основе сапропеля.

По мнению ряда авторов [5, 60], сорбционные свойства сапропелей связаны, прежде всего, с гуминовыми и фульвовыми кислотами в их составе. Наличие большого количества азот- и кислородсодержащих функциональных групп на их поверхности, в т. ч. отрицательно заряженных, обуславливает высокую сорбционную способность. В частности, механизмы взаимодействия

фульвокислот с металлами включают адсорбцию, хелатирование, окислительно-восстановительные реакции и, как следствие, изменение морфологии, подвижности, токсичности и биодоступности металлов в естественной среде [5]. По данным [68], гуминовые вещества из разных климатических зон обладают разным сорбционным сродством к токсикантам, что следует учитывать при разработке сорбентов на основе гуминовых веществ.

Установлено, что сорбенты, синтезированные с использованием сапропеля, эффективны в очистке сточных вод/водных поверхностей от нефти и нефтепродуктов [69–72], фенола и других органических загрязнителей [70, 73, 74], тяжёлых металлов – Pb [17, 70, 75], Ni [65, 69, 70], Cu [70, 76, 77], Zn [69, 70, 75], Cr [69, 70] и др., фторидов [17], красителей [70, 77].

Наилучшими сорбционными характеристиками в отношении ионов металлов обладают сорбенты, полученные термической карбонизацией сапропелей [70, 73]. Так, карбонизация при 600 °С в окислительной среде смеси 100:5 сапропель:бентонит позволяет синтезировать углеродно-минеральный сорбент, который активно поглощает ионы  $\text{Cu}^{2+}$ , иод и метиловый оранжевый из природных и сточных вод и, следовательно, пригоден для их очистки [77]. Однако, по данным [17], сапропель не адсорбирует нитраты из водных растворов. Карбонатный и кремнезёмистый сапропели могут быть использованы в качестве активаторов алюмосиликатных сорбентов для эффективного обесцвечивания высокоцветных поверхностных природных вод [78].

В настоящее время углеводородное загрязнение почв считается одним из самых крупномасштабных. Нефть и нефтепродукты содержат вещества канцерогенного, тератогенного и мутагенного действия, которые могут нанести серьёзный ущерб окружающей среде, в связи с чем ремедиация нефтезагрязнённых почв является приоритетной экологической задачей, особенно актуальной в странах с активной нефтедобычей [3, 46, 79]. Ремедиация загрязнённых нефтью почв осуществляется с помощью механических, физико-химических и биологических методов. Несмотря на определённые недостатки физико-химических методов (необходимость утилизации использованных сорбентов и др.), они активно используются для восстановления почв. В качестве нефтепоглощающих сорбентов описаны нативные и модифицированные минеральные порошки (глина, кремнезём, диа-

томит, керамзит, перлит, вермикулит, доломит и др.), углеродные сорбенты (активированный уголь, сапропель, бурый и каменный уголь, карбонизат и др.), сорбенты на основе растительного сырья (торф, лигнин, целлюлоза, мох, рисовая/гречневая шелуха, пшеничные отруби, высушенные початки кукурузы, солома, опилки, древесная стружка, сосновая кора, шерсть и др.), синтетические (полипропилен, полиуретан, формованный полиэтилен с полимерными наполнителями, каучуковая крошка, синтепон и др.) и биосорбенты – носители микроорганизмов-деструкторов [3, 46, 47, 80–82].

Так, установлено, что сорбент на основе гидролизного лигнина и кремнезёмного сапропеля ускоряет биodeградацию углеводородов нефти в почве [72, 83].

Для модификации текстуры углерод-минеральных материалов из карбонизированных сапропелей применяется обработка водяным паром: сокращается число макропор и увеличивается количество мезо- и микропор [83].

Извлечённые из сапропеля гуминовые вещества также могут быть использованы в качестве сорбентов на нефтезагрязнённых почвах. В литературе представлено много работ, в которых оценены сорбирующая способность по отношению к нефтяным углеводородам гуминовых веществ, извлечённых из торфа [84], бурого угля/леонардита [85–87], либо источник гуминовых веществ не указан. В частности, установлено стимулирующее действие извлечённого из бурого угля гумата калия на деструкцию нефтяных углеводородов и биологическую активность местной нефте-разлагающей микробиоты чернозёмов при любом уровне нефтяного загрязнения [88].

Кроме того, гуматы различного происхождения могут быть использованы в качестве промывочных агентов нефтезагрязнённых почв, снижая сорбцию нефтяных углеводородов и ГМ на почвенных частицах, стимулируя развитие углеводород-окисляющей микробиоты почв, а также для стимуляции биохимического окисления нефти [89, 90].

Перспективным направлением ремедиации нефтезагрязнённых почвенных экосистем и техногенных грунтов является использование биосорбентов, в которых в качестве матрицы используется сапропель и другие природные (керамзит, силикагель, перлит, бентонит, торф, агар, агароза, каррагинан, коллаген, альгинат натрия, хитозан, целлюлоза) или химические материалы (полиуретан, тефлон, полипропи-

лен, полиакриламид, фенолформальдегидные пены) [91, 92]. Так, при использовании комбинированного мелиоранта, состоящего из известкового сапропеля, обработанного биопрепаратом серии «Нафтокс» на основе аэробных углеводородокисляющих бактерий рода *Pseudomonas*, снижение содержания нефтепродуктов в дерново-подзолистой почве за 90 сут модельного эксперимента составило 86–88 % [93]. Биоремедиация экономически эффективна в регионах с оптимальной влажностью для плодородных почв, однако в условиях экстремальных температур, высокой инсоляции, повышенной солёности среды и низкой влажности её применение может быть ограничено [94].

Кроме того, сапропель пригоден для ремедиации загрязнённых радионуклидами почв; при его внесении радионуклиды активно сорбируются, а их миграция из почвы в растение снижается [45, 95]. Установлена прочная фиксация радионуклидов ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ) сорбентом на основе гидролизного лигнина и кремнезёмистого сапропеля [72].

Макропористые углерод-минеральные материалы из карбонизированных сапропелей рассматриваются также в качестве простых и доступных носителей катализаторов (**Fe, Ni, Co, Mo**), причём их кислотная обработка приводит к увеличению числа поверхностных функциональных кислородсодержащих групп и способствует стабилизации нанесённых металлов в высокодисперсном состоянии [83].

## Заключение

Сапропели, используемые в качестве сорбентов для «зелёной утилизации» поступающих в окружающую среду токсикантов, относятся к возобновляемым природным ресурсам, имеют низкую себестоимость, высокую эффективность, возможность повторного использования в качестве мелиорантов. Несмотря на то, что сапропели из различных озёр умеренного пояса весьма значительно отличаются по химическому составу и свойствам, тем не менее, имеют общие черты: относительно высокое содержание органического вещества (более 15%), богатый макро- и микроэлементный состав. Анализ физико-химических свойств и состава органической и минеральной части сапропелей позволяет отнести их к весьма ценному природному сырью многоцелевого назначения: удобрения и мелиоранты в сельском хозяйстве, сырьё для производства гуминовых

препаратов, биологически активных добавок, сорбентов, строительных и композиционных материалов и т. д.

Широкое распространение сапропелей в пределах водоёмов умеренного пояса, низкая стоимость, достаточно простая технология добычи и применения, наряду с достаточно высокими сорбционными свойствами делают перспективным использование этого природного сырья в качестве сорбентов / для производства сорбентов для очищения водоёмов, сточных вод и почв от тяжёлых металлов и нефтяных углеводородов, ремедиации загрязнённых нефтепродуктами и радионуклидами почв.

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

### References

1. Yurak V.V., Apakashev R.A., Lebzin M.S., Malyshev 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
2. Zagrebin E.M., Sosnov A.V., Sadovnikov S.V., Zemlyakova M.A., Putykin Y.G., Shapovalov A.A. New high-tech sorbents and sorbents-bio-destructors based on humic acids as remediation and remediation of contaminated soils // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 4. P. 21–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-029-037
3. Lisichkin G.V., Kulakova I.I. Elimination of emergency oil spills: state and problems (review) // Russian Journal of Applied Chemistry. 2022. V. 95. No. 9. P. 1082–1110 (in Russian) doi: 10.31857/S0044461822090018
4. Chaplina T.O., Pakhnenko V.P. Peculiarities of surface water purification from hydrocarbons using natural sorbents // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 38–44. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044
5. Song C., Sun S., Wang J., Gao Y., Yu G., Li Y., Liu Z., Zhang W., Zhou L. Applying fulvic acid for sediment metals remediation: Mechanism, factors, and prospect // Front. Microbiol. 2023. V. 13. Article No. 1084097. doi: 10.3389/fmicb.2022.1084097
6. Rubinshtein A.Ya. Biogenic soils. Moskva: Nauka, 1986. 87 p. (in Russian).
7. Shtin S.M. Lake sapropels and their complex development / Ed. I.M. Yaltants. Moskva: Izdatelstvo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. 373 p. (in Russian).
8. Krivonos O.I., Belskaya O.B. A new waste-free integrated approach for sapropel processing using supercritical fluid extraction // J. Supercrit. Fluids. 2020. V. 166. Article No. 104991. doi: 10.1016/j.supflu.2020.104991
9. Anisimova T.Yu. Use of peat and sapropel resources in agriculture of non-chernozem zone of Russia: status of the issue and prospects // Problems of agrochemistry and ecology. 2022. No. 1. P. 51–58 (in Russian). doi: 10.26178/AE.2022.76.68.004
10. Starink M., Bär-Gilissen M.J., Bak R.P., Cappenberg T.E. Quantitative centrifugation to extract benthic protozoa from freshwater sediments // Appl. Environ. Microbiol. 1994. V. 60. No. 1. P. 167–173. doi: 10.1128/aem.60.1.167-173.1994
11. Gašiorowski M., Sienkiewicz E. The sources of carbon and nitrogen in mountain lakes and the role of human activity in their modification determined by tracking stable isotope composition // Water Air Soil Pollut. 2013. V. 224. No. 4. Article No. 1498. doi: 10.1007/s11270-013-1498-0
12. Gašiorowski M., Stiens J., Sienkiewicz E., Sekudewicz I. Geochemical variability of surface sediment in post-mining lakes located in the Muskau Arch (Poland) and its relation to water chemistry // Water Air Soil Pollut. 2021. V. 232. Article No. 108. doi: 10.1007/s11270-021-05057-8
13. Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. Freshwater sapropel (gyttja): its description, properties and opportunities of use in contemporary agriculture // Agronomy Research. 2016. V. 14. No. 3. P. 929–947.
14. Vincevica-Gaile Z., Stankevica K. Impact of micro- and macroelement content on potential use of freshwater sediments (gyttja) derived from lakes of eastern Latvia // Environ. Geochem. Health. 2018. V. 40. No. 5. P. 1725–1738. doi: 10.1007/s10653-017-9912-y
15. Vanadziņš I., Mārtiņšone I., Kļaviņa A., Komarovska L., Auce A., Dobkeviča L., Sprūdža D. Sapropel – mining characteristics and potential use in medicine // Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences. 2022. V. 76. No. 2. P. 188–197. doi: 10.2478/prolas-2022-0029
16. Kurzo B.V., Makarenko T.I., Hajdukiewicz O.M. Opportunities of the joint development of peat and sapropel deposits for agricultural in Belarus // Trudy Instorfa. 2019. No. 19 (72). P. 26–32 (in Russian).
17. Albrektienė-Plačakė R., Bakšienė K., Gargasas J. Investigation on applying biodegradable material for removal of various substances (fluorides, nitrates and lead) from water // Materials. 2023. V. 16. Article No. 6519. doi: 10.3390/ma16196519
18. Bakšienė E., Ciūnys A. Dredging of lake and application of sapropel for improvement of light soil properties // J. Environ. Eng. Landscape Manage. 2012. V. 20. No. 2. P. 97–103. doi: 10.3846/16486897.2011.645824
19. Stankeviča K., Kļaviņš M. Sapropelis un tā izmantošanas iespējas // Materials Science and Applied Chemistry. 2013. V. 29. P. 109–126. doi: 10.7250/msac.2013.028
20. Topachevskiy I.V. Sapropels of freshwater reservoirs of Ukraine // Geologiya i poleznye iskopaemye mirovogo okeana. 2011. No. 1. P. 66–72 (in Russian).

21. Kamulali T.M., McGlue M.M., Stone J.R., Goodman P.J., Cohen A.S. Paleocological analysis of Holocene sediment cores from the southern basin of Lake Tanganyika: implications for the future of the fishery in one of Africa's largest lakes // *J. Paleolimnol.* 2022. V. 67. P. 17–34. doi: 10.1007/s10933-021-00219-4
22. Minakovskiy A.F., Ignatovets O.S., Shatilo V.I., Sergievich D. S., Bosak V.N. Characteristics and prospects of using different types of sapropel // *Technological aspects of cultivation of agricultural crops: sbornik statey XVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu kafedry zemledeliya*. Gorki: BGSKhA, 2020. P. 105–107 (in Russian).
23. Maltsev A.E., Leonova G.A., Bobrov V.A., Krivonogov S.K. Geochemistry of Holocene sapropels from small lakes of the southern Western Siberia and eastern Baikal regions. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2019. 444 p. (in Russian). doi: 10.21782/B978-5-6041446-9-5
24. Mostovich E.A. Status and prospects of sapropel use and production // *Moscow Economic Journal*. 2020. No. 8. P. 116–125 (in Russian). doi: 10.24411/2413-046X-2020-10591
25. Bobrov V.A., Leonova G.A., Orlova L.A., Krivonogov S.K., Fedorin M.A., Markova Y.N. Investigation into the elemental composition of sapropel from Lake Kirek (West Siberia) by SR XFA technique // *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2012. V. 6. No. 3. P. 458–463. doi: 10.1134/S1027451012050072
26. Georgievskiy V.I., Shevelev N.S., Khorolskiy A.A., Mitin B.E., Nikitin E.M., Ulasevich T.P. Chemical composition of sapropels of different deposits and the possibility of their use in livestock // *Izvestiya TSKhA*. 1988. No. 2. P. 155–161 (in Russian).
27. Adeeva L.N., Kovalenko T.A., Krivonos O.I., Plaksin G.V., Strunina N.N. Determination of the chemical composition of sapropel // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2009. V. 52. No. 3. P. 121–123 (in Russian).
28. Eliseev A.N., Baguta M.Yu., Belova S.S., Stepanov A.A. Chemical composition and biological properties of sapropel // *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2011. No. 1. P. 65–67 (in Russian).
29. Leonova G.A., Bobrov V.A., Lazareva E.V., Bogush A.A., Krivonogov S.K. Biogenic contribution of minor elements to organic matter of recent lacustrine sapropels (Lake Kirek as example) // *Lithol. Miner. Resour.* 2011. V. 46. P. 99–114. doi: 10.1134/S0024490211010044
30. Strakhovenko V.D., Taran O.P., Ermolaeva N.I. Geochemical characteristics of the sapropel sediments of small lakes in the Ob'-Irtys interfluvies // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55. No. 10. P. 1160–1169. doi: 10.1016/j.rgg.2014.09.002
31. Grantina-Ievina L., Karlsons A., Andersone-Ozola U., Ievins G. Effect of freshwater sapropel on plants in respect to its growth-affecting activity and cultivable microorganism content // *Zemdirbyste-Agriculture*. 2014. V. 101. No. 4. P. 355–366. doi: 10.13080/z-a.2014.101.045
32. Agafonova L., Alsina I., Sokolov G., Kovrik S., Bambalov N., Apse J., Rak M. New kinds of sapropel and peat based fertilizers // *Environment. Technology. Resources: Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*. 2015. V. 2. P. 20–26. doi: 10.17770/etr2015vol2.271.
33. Leonova G.A., Bobrov V.A., Krivonogov S.K., Bogush A.A., Bychinskii V.A., Mal'tsev A.E., Anoshin G.N. Biogeochemical specifics of sapropel formation in Cisbaikalian un-drained lakes (exemplified by Lake Ochki) // *Russ. Geol. Geophys.* 2015. V. 56. No. 5. P. 745–761. doi: 10.1016/j.rgg.2015.04.006
34. Uspenskaya O.N., Vasyuchkov I.Yu. Trace elements in sapropel – natural fertilizer material for organic farming // *Agrochemistry*. 2019. No. 10. P. 52–57 (in Russian). doi: 10.1134/S0002188119100132
35. Baricz A., Levei E.A., Şenilă M., Pînzaru S.C., Aluăş M., Vulpoi A., Filip C., Tripon C., Dădârlat D., Buda D.M., Dulf F.V., Pintea A., Cristea A., Muntean V., Keresztes Z.G., Alexe M., Banciu H.L. Comprehensive mineralogical and physicochemical characterization of recent sapropels from Romanian saline lakes for potential use in pelotherapy // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. Article No. 18633. doi: 10.1038/s41598-021-97904-1
36. Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bychinsky V.A., Bobrov V.A., Maltsev A.E., Tikhova V.D., Miroshnichenko L.V., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E. Biogeochemistry and element speciation in sapropel from freshwater Lake Dukhovoe (East Baikal region, Russia) // *Appl. Geochem.* 2022. V. 143. Article No. 105384. doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105384
37. Zhirkov I.I., Trofimova T.P., Yakutsk, Russia Sapropel resources of Lake Kubalakh, Yakutsk // *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2022. No. 2 (26). P. 39–46 (in Russian). doi: 10.25587/SVFU.2022.26.2.005
38. Sleptsova T.V., Abramov A.F. Assessing sapropel raw materials from lake deposits of the Sakha Republic Kobyai ulus (Yakutia) and its prospects use in agricultural production // *Bulliten KrasSAU*. 2022. No. 7. P. 46–51 (in Russian). doi: 10.36718/1819-4036-2022-7-46-51
39. Sazanov A.V., Sazanova M.L., Zhuikova I.A., Tugarinov L.V. Chemical composition assessment of sapropels from different deposits // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 2. P. 108–116 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-108-116
40. Kostenkov N.M. Ecological and Agrochemical estimate of sedimentary deposits of lakes on marine terraces of coast Sea of Japan // *Theoretical and Applied Ecology*. 2014. No. 2. P. 30–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-030-034
41. Yakimenko O.S., Terekhova V.A. Humic preparations and the assessment of their biological activity for certification purposes // *Eurasian Soil Sci.* 2011. V. 44. No. 11. P. 1222–1230. doi: 10.1134/S1064229311090183

42. Fedoseeva E.V., Terekhova V.A., Yakimenko O.S., Gladkova M.M. Ecotoxicological evaluation of commercial humates of different origin using microalgae *Scenedesmus quadricauda* // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 4. P. 45–49 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-4-045-049
43. Loskutov S.I., Pukhalsky Y.V., Mityukov A.S. Vorobyov N.I., Glushakov R.I. Effect of various fractions of an ultradispersed humate-sapropel suspension on the growth, development, and quality of basil (*Ocimum basilicum* L.) plants as compared to the use of chemical fertilizers // Russ. Agricult. Sci. 2023. V. 49. P. 627–633. doi: 10.3103/S1068367423060125
44. Rumyantsev V.A., Pukhalskii Ya.V., Loskutov S.I., Mityukov A.S., Vorob'yov N.I., Yakubovskaya A.I., Kameneva I.A., Nikiticheva G.V., Gorodnova L.A., Berdysheva K.N., Kovalchuk A.I., Meshcheryakov D.D. Use of a humate-sapropelic suspension when growing sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.) in protected soil conditions (greenhouse) // Dokl. Earth Sci. 2024. V. 516. P. 774–780. doi: 10.1134/S1028334X24600865
45. Konoplev A.V., Popov V.E., Maskalchuk L.N. Development of amendments for rehabilitation of soils, contaminated by radionuclides, and assessment of their application efficacy // Radioprotection. 2009. V. 44. No. 5. P. 135–139. doi: 10.1051/radiopro/20095029
46. Vasileva G.K., Strizhakova E.R., Bocharnikova E.A., Semenyuk N.N., Yatsenko V.S., Slyusarevskiy A.V., Baryshnikova E.A. Oil and petroleum products as soil pollutants. Technology of combined physical and biological treatment of contaminated soils // Rossiyskiy khimicheskii zhurnal. 2013. V. 57. No. 1. P. 79–104 (in Russian).
47. Zabolotskikh V.V., Tankih S.N., Vasilyev A.V. Technological approaches to detoxify and restore contaminated land // Izvestia of RAS SamSC. 2018. V. 20. No. 5-3 (85). P. 341–351 (in Russian).
48. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Zubkova T.A. Novel methodological approaches to the study of sorbents in soils polluted with heavy metals // Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 2019. V. 74. P. 118–122. doi: 10.3103/S0147687419030062
49. Grigorev M., Grigoreva A., Sharvadze R., Chernogradskaya N., Stepanova S. The effectiveness of unconventional feed additives at feeding cattle in conditions Yakutia // Interagromash 2022: Proceedings of XV International Scientific Conference. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham, 2023. V. 574. P. 156–166. doi: 10.1007/978-3-031-21432-5\_17
50. Leonova G.A., Maltsev A.E., Melenevsky V.N., Krivonogov S.K., Kondratyeva L.M., Bobrov V.A., Suslova M.Y. Diagenetic transformation of organic matter in sapropel sediments of small lakes (southern West Siberia and eastern Transbaikalia) // Quat. Int. 2019. V. 524. P. 40–47. doi: 10.1016/j.quaint.2019.03.011
51. Pavlovska I., Klavina A., Auce A., Vanadzins I., Silova A., Komarovska L., Silamikele B., Dobkevica L., Paegle L. Assessment of sapropel use for pharmaceutical products according to legislation, pollution parameters, and concentration of biologically active substances // Sci. Rep. 2020. V. 10. Article No. 21527. doi: 10.1038/s41598-020-78498-6
52. Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A. Features of Pb, Sb, Cd accumulation in sediments of small lakes in the south of the Republic of Karelia // Transactions of KarRC RAS. 2020. No. 4. P. 75–94 (in Russian). doi: 10.17076/lim1198
53. Tsybekmitova G.T., Kuklin A.P., Tsyganok V.I. Heavy metals in bottom sediments of Lake Kenon (the Trans-Baikal Territory, Russia) // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2019. V. 103. No. 2. P. 286–291. doi: 10.1007/s00128-019-02645-7
54. Taran O.P., Boltentkov V.V., Yermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Delii I.V., Romanov R.E., Strakhovenko V.D. Relations between the chemical composition of organic matter in lacustrine ecosystems and the genesis of their sapropel // Geochem. Int. 2018. V. 56. P. 256–265. doi: 10.1134/S0016702918030096.
55. Platonov V.V., Polovetskaya O.S. The features of chemical composition and the biological activity of sapropelae // Journal of New Medical Technologies. eEdition. 2012. No. 3. Article No. 2-24 [Internet resource] <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2012-1/4066.pdf> (Accessed: 01.02.2024) (in Russian).
56. Platonov V.V., Khadartsev A.A., Chunosov S.N., Fridzon K.Y. The biological effect of sapropel // Fundamental Research. 2014. No. 9-11. P. 2474–2480 (in Russian).
57. Kilina E.S., Tronova T.M., Klopotova N.G. Biological activity of therapeutic sapropelic muds of Siberia // Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kultury. 1997. No. 2. P. 23–25 (in Russian).
58. Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M. Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review) // Eurasian Soil Sc. 2021. V. 54. P. 1826–1854. doi: 10.1134/S1064229321120164
59. Strus O.Y. Study of sapropel extracts from Prybych natural deposits // J. Chem. Pharm. Res. 2015. V. 7. No. 6. P. 133–137.
60. Adeeva L.N., Platonova D.S., Masorov M.S., Didenko T.A. Humic acids from silica sapropel: infrared spectroscopic and thermal analysis // Butlerov Communications. 2013. V. 34. No. 6. P. 65–69 (in Russian).
61. Sherysheva N.G. Bacteriobenthos of sapropel of sulfide lake Shungaldan (National Park “Mari Chodra”, Mari El Republic) // Izvestiya of RAS SamSC. 2023. V. 25. No. 5 (115). P. 195–202 (in Russian).
62. Sleinus D., Sinka M., Korjajkins A., Obuka V., Nikolajeva V., Brencis R., Savicka E. Properties of sound absorption composite materials developed using flax fiber, sphagnum moss, vermiculite, and sapropel // Materials. 2023. V. 16. No. 3. Article No. 1060. doi: 10.3390/ma16031060.
63. Vėjelis S., Karimova M.B., Kuatbayeva T.K., Kairytyė A., Šeputytė-Jucikė J. Sapropel as a binding material for wood processing waste in the development of

- thermal insulation biocomposite // *Materials*. 2023. V. 16. No. 6. Article No. 2230. doi: 10.3390/ma16062230
64. Balčiūnas G., Žvironaitė J., Vėjelis S., Jagniatinskis A., Gaidučis S. Ecological, thermal and acoustical insulating composite from hemp shives and sapropel binder // *Industrial Crops and Products*. 2016. V. 91. P. 286–294. doi: 10.1016/j.indcrop.2016.06.034
65. Adeeva L.N., Platonova D.S., Puzhel A.V., Didenko T.A., Belykh N.A. Bifunctional sorbent for sewage treatment obtained from sapropel // *Butlerovskie soobshcheniya*. 2013. V. 34. No. 6. P. 70–75 (in Russian).
66. Potapova I.A., Agliulin V.K., Purygin P.P., Zarusbin Yu.P., Maksimov N.M. Humic acids as adsorbents of sulfur and other harmful impurities from oil products // *Butlerov Communications*. 2023. V. 76. No. 10. P. 21–29 (in Russian). doi: 10.37952/ROI-jbc-01/23-76-10-21
67. Lavrenov A.V., P'yanova L.G., Sedanova A.V., Luzyanina L.S. Nanostructured carbon sorbent impregnated with betulin // *Solid Fuel Chem*. 2015. V. 49. P. 7–13 doi: 10.3103/S0361521915010085
68. Zhang Z., Liu S., Wang X., Huang S., Sun K., Xia X. Differences in structure and composition of soil humic substances and their binding for polycyclic aromatic hydrocarbons in different climatic zones // *Environ. Pollut*. 2023. V. 322. Article No.121121. doi: 10.1016/j.envpol.2023.121121
69. Kirejcheva L.V., Khokhlova O.B. Sorbent for integrated treatment of water and ground to remove petroleum products and heavy metals // Patent RU 2198987 C2. Application: 2000132355/13, 25.12.2000. Date of publication: 20.02.2003. Bull. 5 (in Russian).
70. Adeeva L.N., Kovalenko T.A. Removal of organic substances and metal ions from water using a carbon-mineral sapropel sorbent // *Russ. J. Appl. Chem*. 2012. V. 85. P. 557–563. doi: 10.1134/S1070427212040040
71. Krivonos O.I., Terekhova E.N., Babenko A.V., Arbuzov A.B., Belskaya O.B. Conversion of sapropel on CoMo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in supercritical ethanol // *Petroleum Chemistry*. 2021. V. 61. No. 2. P. 157–165 (in Russian). doi: 10.31857/S0028242121020039
72. Latypova D.R., Badamshin A.G., Kuleshov S.P. Timashev E.O., Kulnitskiy B.A., Tomilov Yu.V., Nifantiev N.E., Dokichev V.A. New high-efficiency carbon-silica sorbent // *Russ. J. Appl. Chem*. 2015. V. 88. No. 9. P. 1428–1433. doi: 10.1134/S1070427215090074
73. Plaksin G.V., Levitskiy V.A., Chernyshev A.K., Shipitsyn D.V., Tret'jakov A.G., Likholobov V.A. Porous carbon material preparation process // Patent RU 2264253 C1. Application: 2004102619/15, 29.01.2004. Date of publication: 20.11.2005. Bull. 32 (in Russian).
74. Platonova D.S., Bednyuk A.E., Adeeva L.N. Sorption of phenol by modified humin sorbent from sapropel // *Herald of Omsk University*. 2017. No. 2 (84). P. 56–59 (in Russian).
75. Birgėlaitė R., Valskys V., Ignatavičius G. Use of sapropel for removal of heavy metals from solution // *Sci. – Future Lith*. 2016. V. 8. No. 4. P. 388–396 (in Lithuanian). doi: 10.3846/mla.2016.946
76. Krivonos O.I., Babenko A.V., Belskaya O.B. New approaches for regulation of structure and adsorption properties of biochar based on freshwater sediments (sapropels) // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2024. V. 680. Article No. 132717. doi: 10.1016/j.colsurfa.2023.132717
77. Zykova I.V., Isakov V.A., Solov'eva A.M. Preparation and characterization of carbon-mineral sorbents based on sapropel from Novgorod oblast. Part 2 // *Fibre Chem*. 2019. V. 50. No. 6. P. 491–495. doi: 10.1007/s10692-019-10016-5
78. Gladkikh S.N. Sorption method of discoloration of high-color surface natural waters // *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya*. 2023. No. 1. P. 32–36 (in Russian).
79. Fang X., Zhang M., Zheng P., Wang H., Wang K., Lv J., Shi F. Biochar-bacteria-plant combined potential for remediation of oil-contaminated soil // *Front. Microbiol*. 2024. V. 15. Article No. 1343366. doi: 10.3389/fmicb.2024.1343366
80. Belik E. Intensification of bioremediation of oil contaminated soils with biosorbents on the basis carbonizate // *Vestnik PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika*. 2014. No. 3 (15). P. 127–139 (in Russian).
81. Fokina H.B., Myazin B.A., Gubkina T.G. Studies of soil purification from oil using sorbents of different modification in the conditions of laboratory experiment // *Ecological problems of northern regions and ways of their solution: materialy V Vseross. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem*. V. 2. Apatity: KNTs RAN, 2014. P. 86–90 (in Russian).
82. Buluktaev A.A., Adyanova A.B., Jimbeev N.V., Mukabenova R.A., Mandzhieva S.S., Vasilyeva G.K. Use of natural organic sorbents to increase the effectiveness of bioremediation of oil-polluted soils of the Republic of Kalmykia // *Steppe Science*. 2023. No. 4. P. 146–161 (in Russian). doi: 10.24412/2712-8628-2023-4-146-161
83. Terekhova E.N., Lavrenov A.V., Krivonos O.I. Effect of chemical treatment on properties of carbon-mineral materials from sapropel // *Izvestiya Vuzov. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2016. V. 59. No. 8. P. 90–95 (in Russian).
84. Fomicheva N.V., Smirnova Yu.D., Rabinovich G.Yu. Influence of new humic preparation on remediation of oil-contaminated soil // *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya*. 2022. V. 12. No. 2. P. 310–320 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-310-320
85. Vaysman Ya.I., Glushankova I.S., Rudakova L.V., Kumi V.V., Tokarev I.P. Development of technology remediation soil contaminated by oil using Gumikom // *Neftyanoe khozyaystvo*. 2013. No. 10. P. 128–131 (in Russian).
86. Minnikova T., Kolesnikov S., Revina S., Ruseva A., Gaivoronsky V. Enzymatic assessment of the state of oil-contaminated soils in the South of Russia after bioremediation // *Toxics*. 2023. V. 11. Article No. 355. doi: 10.3390/toxics11040355

87. Nazarov A.M., Tuktarova I.O., Davletshin T.K., Chetverikov S.P. Processing and research of effectiveness of new biopreparates based on *Rhodococcus* sp. H33, gumates and lignosulfonates for the cleaning of neftezainously contaminated soils // *Neftegazovoe delo*. 2023. V. 21. No. 6. P. 310–321 (in Russian). doi: 10.17122/ngdelo-2023-6-310-321
88. Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Kazeev K.S. Impact of ameliorants on the biological condition of oil-contaminated black soil // *Soil Env.* 2019. V. 38. P. 170–180. doi: 10.25252/SE/19/101872
89. Gretchischeva N.Yu., Perminova I.V., Meshcheryakov S.V. Humic compounds in treatment of oil contaminated environments // *Ecology and Industry of Russia*. 2016. V. 20. No. 1. P. 30–36 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2016-1-30-36
90. Grechishcheva N.Yu., Fekhretdinova D.R., Murygina V.P., Gaydamaka S.N. Evaluation of the effectiveness of humic substances use as washing agents of oil-contaminated soils // *Environmental protection in oil and gas complex*. 2019. No. 6 (291). P. 22–26 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2019-6(291)-22-26
91. Aggarwal S., Chakravarty A., Ikram S. A comprehensive review on incredible renewable carriers as promising platforms for enzyme immobilization and thereof strategies // *Int. J. Biol. Macromol.* 2021. V. 167. P. 962–986. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.11.052
92. Kistovich A., Pokazeev K., Chaplina T. Surface Contamination // *Advanced Studies in Ocean Physics. Springer Oceanography*. Springer, Cham, 2021. P. 95–127. doi: 10.1007/978-3-030-72269-2\_3
93. Ilinskiy A.V., Chernyakova O.N. To the question of bioremediation in relation to the agricultural land harnessed by oil hydrocarbons // *Modern trends in the development of agrarian complex: materialy mezhdunarod. nauchno-praktich. konf. Solenoe Zaymishche*, 2016. P. 92–97.
94. Al-Mebayedh H., Niu A., Lin C. Strategies for cost-effective remediation of widespread oil-contaminated soils in Kuwait, an environmental legacy of the first Gulf War // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 344. Article No. 118601. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118601
95. Maskalchuk L.N., Baklai A.A., Leont'eva T.G. Effect of the organic and mineral constituents of sapropels from Belarus Republic on the selective sorption of radiocesium // *Radiochemistry*. 2018. V. 60. P. 100–103. doi: 10.1134/S1066362218010150

## Оценка энергетических, ресурсосберегающих, экологических, продуктовых и экономических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных

© 2024. Б. В. Ермоленко, к. т. н., доцент, М. С. Прутских, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, e-mail: bermol@mail.ru, maxim.prutskikh@yandex.ru

Статья посвящена анализу экологических проблем обращения с продуктами жизнедеятельности сельскохозяйственных животных и энергетическому направлению их использования с получением в качестве побочной продукции высококачественных органических удобрений. Проводимый анализ поголовья основных видов сельскохозяйственных животных в различных регионах Российской Федерации позволяет оценить годовые объёмы образования продуктов их жизнедеятельности с применением соответствующих удельных показателей. Эта информация ложится в основу определения массы выбросов различных загрязняющих веществ в атмосферу (включая парниковые газы), попадания загрязнённых сточных вод в водные объекты, размещения отходов на отгораемых из оборота сельскохозяйственных землях в процессах образования и хранения навоза, помёта и навозных сточных вод в животноводческих хозяйствах. В качестве возможного направления утилизации отходов с целью снижения их воздействия на окружающую среду и решения задач ресурсосбережения выбирается получение биогаза, тепловой и электрической энергии, высококачественных органических удобрений. Инвестиционное проектирование биогазовых энергетических комплексов и разработка региональных программ развития возобновляемой энергетики требует проведения эколого-экономического обоснования. Его информационной основой является разработанная авторами статьи система топливных, электроэнергетических, теплоэнергетических, ресурсосберегающих, экологических, эколого-экономических, экономических и продуктовых потенциалов. Представлена пошаговая методика их оценки, для которой использовалась информационно-вычислительная система, созданная на кафедре промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Система предназначена для оценки потенциалов солнечной и ветровой энергетики, энергетического использования различных видов отходов, растительной биомассы и других видов возобновляемых источников энергии. Рассчитаны потенциалы энергетического использования продуктов жизнедеятельности животных для различных видов животноводства с дифференциацией по районам, субъектам и федеральным округам России. Имея эту информацию, каждая отдельная административно-территориальная единица может провести эколого-экономическое обоснование инвестирования средств в программы утилизации продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные животные, продукты жизнедеятельности, оценка, потенциалы (топливный, электроэнергетический, теплоэнергетический, ресурсосберегающий, экологический, экономический, продуктовый), информационно-вычислительная система.

## Assessment of energy, resource saving, environmental, product and economic potential of farm animal products

© 2024. B. V. Ermolenko ORCID: 0000-0003-2703-6102?  
M. S. Prutskikh ORCID: 0000-0003-0184-294X?  
Russian University of Chemical Technology D. I. Mendeleev,  
9, Miusskaya Square, Moscow, Russia, 125047,  
e-mail: bermol@mail.ru, maxim.prutskikh@yandex.ru

The paper is devoted to the analysis of environmental problems of farm animal waste management and the energy direction of their use to obtain high-quality organic fertilizers as by-products. The analysis of the population of the main types of farm animals in various regions of the Russian Federation allows us to estimate the annual volumes of formation of their vital products using appropriate specific indicators. This information forms the basis for determining the mass of emissions of various pollutants into the atmosphere (including greenhouse gases), contaminated wastewater into water bodies, waste disposal on agricultural land rejected from circulation in the processes of formation and storage of manure, litter and manure wastewater in livestock farms. The results of the calculations indicate the significance of the environmental damage caused. Calculations were performed using certified techniques and software products. The production of biogas, thermal and electric energy, and high-quality organic fertilizers is chosen as a possible direction of waste disposal in order to reduce their impact on the environment and solve resource-saving problems. The investment design of biogas

energy complexes and the development of regional renewable energy development programs require an environmental and economic justification. Its information basis is the system of fuel, electric power, thermal energy, resource-saving, ecological, ecological-economic, economic and product potentials developed by the authors of this paper. A step-by-step methodology for their assessment is presented. Information and computing system created at the Department of Industrial Ecology of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology was used for the assessment. The system is designed to assess the potentials of solar and wind energy, energy use of various types of waste, plant biomass and other types of renewable energy sources. The potentials of energy utilization of farm animal waste products for various types of animal husbandry with differentiation by regions, subjects and federal districts of Russia have been calculated. With this information, each separate administrative-territorial unit can carry out an ecological and economic justification of investment in programs of farm animal waste products utilization.

**Keywords:** farm animals, waste products, assessment, potentials (fuel, electric power, thermal energy, resource-saving, environmental, economic, product), information and computing system.

Животноводство – одна из активно развивающихся отраслей народного хозяйства на территории Российской Федерации (РФ). В качестве основных направлений деятельности в отрасли выступают скотоводство, овцеводство, свиноводство и птицеводство. Животноводство призвано обеспечить страну продуктами питания, сырьём для пищевой промышленности, мехом, кожей, шерстью, пухом, костной мукой, тягловой силой, органическим удобрением. Решение этих проблем осуществляется наращиванием и поддержанием поголовья скота в хозяйствах разных категорий. На конец 2022 г. в хозяйствах всех категорий поголовье крупного рогатого скота (КРС) составляло 17,49 млн голов, свиней – 27,61 млн голов, овец и коз – 19,08 млн голов, птицы – 551 млн голов, а в сельскохозяйственных организациях – 7,96 млн голов КРС, 25,65 млн голов свиней, 3,17 млн голов овец и коз, птицы – 470 млн голов [1].

Содержание и откорм сельскохозяйственных животных сопровождаются значительным негативным воздействием на окружающую среду (ОС). Животноводческие комплексы являются источниками локального загрязнения атмосферы такими загрязняющими веществами (ЗВ), как аммиак, сероводород, фенолы, спирты, сложные эфиры, карбонильные соединения, карбоновые кислоты, сульфиды и дисульфиды, меркаптаны, амины, диоксид углерода, пыль животного происхождения [2] и другими продуктами жизнедеятельности животных, зачастую обладающими крайне неприятными запахами.

На крупных животноводческих фермах и в комплексах скапливается большое количество навоза и растительной подстилки. В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов [3] класс опасности отходов животноводства (продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных) зависит от степени их свежести (табл. 1).

По оценкам Национальной мясной ассоциации [4], в 2020 г. в животноводческих хозяйствах всех категорий образовалось около 300 млн т навоза и помёта, в том числе примерно 180 млн т – в сельскохозяйственных организациях и крестьянских фермерских хозяйствах. Половина из этого количества не используется в сельском хозяйстве. Под хранение неиспользуемого навоза уже сейчас занято более 2 млн га сельскохозяйственных земель [5], которые подвергаются химической деградации под воздействием продуктов жизнедеятельности (ПЖ) сельскохозяйственных животных.

Одной из наиболее неприятных проблем, связанных с функционированием животноводческих комплексов и обращением с ПЖ сельскохозяйственных животных, является образование и попадание в атмосферу большого количества таких парниковых газов (ПГ), как метан ( $\text{CH}_4$ ), оксид азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) и  $\text{CO}_2$ . Выбросы парниковых газов от предприятий сельскохозяйственного производства на территории РФ в 2021 г. составили 121,3 млн т  $\text{CO}_2$ -экв [6] или 5,6% от общего годового выброса ПГ страны. В аграрном секторе в качестве источников выбросов ПГ выступают: побочный продукт пищеварения ( $\text{CH}_4$ ), образующийся при ферментации пищи в желудках травоядных животных; системы сбора, хранения и использования навоза и птичьего помёта (выбросы  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$ ); сельскохозяйственные земли после внесения в них навоза в качестве удобрения (выбросы  $\text{N}_2\text{O}$ ); рисовые поля; известкование и внесение карбамида в почвы.

Из опыта многих стран известно, что переработка навоза и птичьего помёта посредством анаэробного брожения с получением биогаза, органических удобрений, тепловой и электрической энергии экологически и экономически выгодны [7, 8]. В этом процессе происходит удаление ПЖ сельскохозяйственных животных из сферы обращения с отходами с соответ-

Таблица 1 / Table 1

Классы опасности продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных  
Hazard classes of farm animal waste products

Наименование продукта жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (отходов) / Name of farm animals waste products	Класс опасности Hazard classes
Навоз крупного рогатого скота (КРС) свежий / Fresh cattle manure	IV
Навоз КРС перепревший / Rotted cattle manure	V
Отходы подстилки при содержании КРС / Waste litter from cattle housing	IV
Стоки навозные от содержания КРС обеззараженные Disinfected manure effluent from cattle housing	IV
Навоз мелкого рогатого скота свежий / Fresh small cattle manure	IV
Навоз мелкого рогатого скота перепревший / Rotted small cattle manure	V
Навоз свиней свежий / Fresh pig manure	III
Навоз свиней перепревший / Rotted pig manure	IV
Отходы подстилки из древесных опилок при содержании свиней Waste litter from sawdust in pig farming	IV
Жидкая фракция сепарации свиного навоза Liquid fraction of pig manure separation	IV
Помёт куриный свежий / Fresh chicken manure	III
Помёт куриный перепревший / Rotted chicken manure	IV
Помёт куриный, выдержанный в помётохранилище, обеззараженный Chicken manure, aged in a manure storage facility, disinfected	IV

ствующим снижением всех видов негативного воздействия на ОС, включая запахи, выбросы метана и закиси азота, отторжение земель под хранение. Биодобриения повышают урожайность и обеспечивают эффективность инвестирования средств, а энергия от сжигания биогаза может быть востребована производителем и другими потребителями.

Развитие на территории страны эффективных систем энергоснабжения на базе ПЖ сельскохозяйственных животных требует проведения эколого-экономического обоснования целесообразности создания таких систем в соответствующих регионах и применения оптимизационных методов их проектирования на стадии обоснования инвестиций. В литературе отсутствует информация о пошаговой методике оценки энергетических, топливных, ресурсосберегающих, экологических, экономических и продуктовых потенциалов применительно к использованию этого вида энергетического ресурса.

Поэтому целью исследования являлась разработка методики оценки таких потенциалов для проведения эколого-экономического обоснования инвестирования средств в строительство биогазовых энергетических комплексов по переработке ПЖ сельскохозяйственных животных, выбора оптимальных направлений инвестирования средств в региональные программы использования

побочных продуктов животноводства и развития возобновляемой энергетики.

### Объекты и методы исследования

**Объекты исследования.** В качестве объектов исследования выступают энергия биомассы, образующейся в процессе жизнедеятельности сельскохозяйственных животных, и получаемые при её использовании такие продукты, как биогаз, электрическая и тепловая энергия, высококачественные органические удобрения.

Потенциальные возможности использования биомассы для производства перечисленных выше продуктов предлагается оценивать с помощью топливного, теплоэнергетического, электроэнергетического потенциалов, потенциалов ресурсосбережения, а также экологических, продуктовых, экономических потенциалов ресурсосбережения и эколого-экономических потенциалов [9].

Ниже приводятся понятия потенциалов как показателей, характеризующих энергетическую, экономическую и экологическую целесообразность энергетического и продуктового использования биомассы ПЖ сельскохозяйственных животных. Оценка потенциалов дифференцируется по видам сельскохозяйственных животных, обитающих на территории районов, субъектов Федерации, федеральных округов и РФ в целом. Значения

потенциалов рассчитываются на годовом интервале времени.

**Топливный потенциал** энергетического использования биомассы оценивает величину годового потенциала её энергии в тоннах условного топлива в год (т у.т./г).

**Теплоэнергетический потенциал** оценивает количество тепловой энергии в Гкал/г, которое можно произвести путём преобразования энергии биомассы в тепло, и, соответственно, экономию тепловой энергии, получаемой при сжигании ископаемых органических топлив.

**Электроэнергетический потенциал** – количество электрической энергии в кВт·ч/г, получаемой при использовании энергии биомассы, а, следовательно, снижение расхода электрической энергии, производимой из ископаемых видов топлива.

**Потенциал ресурсосбережения** задаёт в натуральном выражении (т/год, тыс. м<sup>3</sup>/год) количество ископаемых видов топлива (газа, мазута, угля, дизельного топлива), которое пришлось бы использовать для получения энергии традиционными методами в количестве, соответствующем энергетическому потенциалу рассматриваемой биомассы.

**Экологический потенциал (загрязнение атмосферы)** – величина (т/г, т СО-экв./г, т СО<sub>2</sub>-экв./г) предотвращаемых выбросов ЗВ в атмосферу (т/год), образующихся в топках электростанций и котельных в процессе сжигания газа, мазута, угля, дизельного топлива для получения энергии в количестве, соответствующем энергетическому потенциалу биомассы, с учётом снижения загрязнения атмосферы при прекращении размещения навоза на отторгаемых землях и увеличения загрязнения при производстве биогаза, энергии и удобрений. Экологический потенциал измеряется в т/г предотвращаемого выброса каждого из веществ и по приведённой массе оксида углерода, эквивалентной по воздействию на ОС массе всех выбрасываемых в атмосферу веществ, т. е. в т СО-экв./г. При необходимости можно оценить и предотвращение загрязнения водных объектов (т/г, т TiO<sub>2</sub>-экв./г), и ОС при размещении отходов (т/г, т отх. IV кл.-экв./г).

**Продуктовый потенциал** – совокупность продуктов различного вида, сбалансированных по количеству и качеству, которые позволяют производить максимально возможный объём продукции при их рациональном использовании. Может, в частности, рассматриваться как количество производимых высококачественных удобрений (т/г) в процессе переработки биомассы.

Количество биогаза, тепловой и электрической энергии оценивается в соответствии с топливным, теплоэнергетическим и электроэнергетическим потенциалами.

**Экономический потенциал ресурсосбережения** – величина снижения (изменения) затрат на приобретение и транспортировку топлива и пресной воды в результате замещения традиционной тепловой энергетики на возобновляемую в соответствии с энергетическим потенциалом рассматриваемой биомассы (руб./г).

**Эколого-экономический потенциал** – величина предотвращаемого эколого-экономического ущерба и экологических платежей, а также доходов от продажи квот на выбросы ПГ при замещении на рассматриваемой территории генерирующих объектов традиционной тепловой энергетики на заданные объекты возобновляемой энергетики в соответствии с энергетическими и экологическими потенциалами рассматриваемой биомассы (руб./г).

**Продуктовый экономический потенциал** – изменение стоимости продуктов, получаемых из биомассы, в сравнении с их стоимостью в традиционном исполнении (руб./г).

**Методики оценки потенциалов.** Биомасса, потенциалы которой оцениваются, различаются по видам сельскохозяйственных животных, климатическим условиям, в которых они существуют, используемым кормам, растительным добавкам к перерабатываемому навозу и другим факторам. Количество её в регионе зависит от числа голов каждого вида животных и перечисленных выше факторов. Для определения количества образующихся ПЖ сельскохозяйственных животных, а также объёма производства биогаза, тепловой, электрической энергии и органических удобрений, необходимо обладать соответствующей исходной статистической и нормативной информацией.

**Исходная информация для проведения оценки.** Состав необходимой исходной информации и её источники представлены на рисунке 1.

При наличии статистических данных о поголовье скота каждого  $j$ -го вида в  $r$ -м регионе страны  $N_{jr}^{(гол.ск)}$  (для  $\forall r \in R^{рег}$  и  $\forall j \in J_r^{(вид жив)}$ ) и информации о нормативах образования различных продуктов  $i$ -го вида в процессе жизнедеятельности животных на животноводческих комплексах  $H_{ijr}^{обр отх}$  (т/(гол.·г)) легко



Рис. 1. Исходная информация для проведения оценки потенциалов  
 Fig. 1. Background information for the capacity assessment

определяется годовое количество биомассы ПЖ  $i$ -го вида (для  $\forall i \in I_{jr}^{\text{вид.отх}}$ ), образующихся в течение года от жизнедеятельности животных  $j$ -го вида на территории  $r$ -го региона, т/г:

$$m_{ijr}^{\text{биоотх}} = N_{ijr}^{\text{обротх}} \cdot N_j^{\text{тол.ск}} \quad (1)$$

Зная объёмы образования биогаса  $N_{ijr}^{\text{обр.биогаз}}$  (тыс. м<sup>3</sup>/т) из одной тонны  $i$ -го рассматриваемой биомассы, можно оценить годовой объём производства биогаса, тыс. м<sup>3</sup>/г:

$$V_{ijr}^{\text{биогаз}} = N_{ijr}^{\text{обр.биогаз}} \cdot m_{ijr}^{\text{биоотх}} \quad (2)$$

Анализ состава  $i$ -го биогаса позволяет оценить его теплотворную способность  $q_i^{\text{биогаз}}$  ккал/м<sup>3</sup> для  $\forall i \in I_{jr}^{\text{вид.отх}}$ .

**Топливный потенциал.** Информация о теплотворной способности биогаса из  $i$ -го вида биомассы применяется для оценки величины его топливного потенциала, а, следовательно, и самой  $i$ -й биомассы. Коэффициент пересчёта количества  $i$ -го биогаса в эквивалентное количество условного топлива рассчитывается как:

$$k_{i\text{тту}}^{\text{биогаз}} = q_i^{\text{биогаз}} / q_{\text{усл}}^{\text{топл}} \quad (3)$$

где  $q_{\text{усл}}^{\text{топл}}$  – теплотворная способность условного топлива (7000 ккал/кг).

Топливный потенциал оценивается для:  
 а) биомассы  $i$ -го вида, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных  $j$ -го вида в  $r$ -м регионе, т у.т./г:

$$M_{jr}^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall i \in I_{\text{вид жив}}} \cdot M_{jir}^{\text{топл пот}} \quad (4)$$

б) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных  $j$ -го вида в  $r$ -м регионе, т у.т./г:

$$M_{jr}^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall i \in I_{\text{вид жив}}} \cdot M_{jir}^{\text{топл пот}} \quad (5)$$

в) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных в  $r$ -м регионе, т у.т./г:

$$M_r^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall j \in J_r} \cdot M_{jir}^{\text{топл пот}} \quad (6)$$

г) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных в  $s$ -м субъекте федерации, т у.т./г:

$$M_s^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall r \in R_s} \cdot M_r^{\text{топл пот}} \quad (7)$$

д) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных в  $f$ -м федеральном округе, т у.т./г:

$$M_f^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall s \in S_f^{\text{суб.фед}}} \cdot M_s^{\text{топл пот}} \quad (8)$$

е) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных на всей территории РФ, т у.т./г:

$$M_{\text{РФ}}^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall f \in F_{\text{РФ}}} \cdot M_f^{\text{топл пот}} \quad (9)$$

**Теплоэнергетический потенциал** биотхода  $i$ -го вида, образовавшегося от жизнедеятельности домашних животных  $j$ -го вида в  $r$ -м регионе (Гкал/г) оценивается по величине топливного потенциала  $M_{jir}^{\text{топл пот}}$  с использованием коэффициента пересчёта Гкал тепловой энергии в т у.т. – [10]:

$$k_{\text{тут}}^{\text{тепл эн}} = 0,1486^{\text{т у.т}} / \text{Гкал} \quad (10)$$

$$Q_{ijr}^{\text{тепл эн пот}} = M_{jir}^{\text{топл пот}} / k_{\text{тут}}^{\text{тепл эн}}$$

Аналогично рассчитываются топливные потенциалы  $Q_{jr}^{\text{тепл эн пот}}$ ,  $Q_r^{\text{тепл эн пот}}$ ,  $Q_s^{\text{тепл эн пот}}$ ,  $Q_f^{\text{тепл эн пот}}$ ,  $Q_{\text{РФ}}^{\text{тепл эн пот}}$ .

**Электроэнергетический потенциал** оценивается по той же схеме, но с применением коэффициента пересчёта:

$$k_{\text{тут}}^{\text{эл эн}} = 0,3445 \text{ т у.т.} / \text{тыс.кВт} \cdot \text{ч}$$

$$W_{ijr}^{\text{эл эн пот}} = M_{jir}^{\text{топл пот}} / k_{\text{тут}}^{\text{эл эн}}, \text{ тыс.кВт} \cdot \text{ч} / \text{Г} \quad (11)$$

и таким же образом электроэнергетические потенциалы  $W_{jr}^{\text{эл эн пот}}$ ,  $W_r^{\text{эл эн пот}}$ ,  $W_f^{\text{эл эн пот}}$ ,  $W_s^{\text{эл эн пот}}$ ,  $W_{\text{РФ}}^{\text{эл эн пот}}$ .

**Потенциалы ресурсосбережения** могут быть определены либо по средним для России показателям теплотворной способности природного газа, угля, мазута и дизельного топлива с помощью официальных коэффициентов пересчёта  $k_{\text{т ср тту}}^{\text{топл}}$  [10] или с применением информации о теплотворной способности ископаемого топлива каждого из месторождений и видов используемых мазутов и дизельного топлива для расчёта коэффициентов  $k_{\text{т ср тту}}^{\text{топл}} = q_t^{\text{топл}} \cdot q_{\text{усл}}^{\text{топл}}$ . В общем случае, количество сэкономленного  $t$ -го топлива при замещении его биогазом, произведённым из биомассы  $i$ -го вида, образовавшейся в результате жизнедеятельности  $j$ -х домашних животных в  $r$ -м регионе, получают по той же формуле:

$$M_{ijr}^{\text{рес сб пот}} = M_{jir}^{\text{топл пот}} / k_{\text{тту}}^{\text{топл}}, \text{ т} / \text{Г}. \quad (12)$$

Оцениваются и объёмы ресурсосбережения по отдельным видам сельскохозяйственных животных в регионе их разведения  $M_{tir}^{\text{рес сб пот}}$  и общие показатели экономии топлива на территории административных единиц разного уровня  $M_{tr}^{\text{рес сб пот}}$ ,  $M_{ts}^{\text{рес сб пот}}$ ,  $M_{tf}^{\text{рес сб пот}}$ ,  $M_{t\text{РФ}}^{\text{рес сб пот}}$ .

**Экологические потенциалы.** Если ориентироваться на экологические потенциалы, связанные с уменьшением загрязнения атмосферы при энергетическом использовании ПЖ сельскохозяйственных животных при замещении произведённым биогазом топлива  $t$ -го вида, то они задаются двумя способами: в виде массы предотвращённых выбросов каждого  $v$ -го ЗВ в т/г и в виде приведённой массы веществ локального загрязнения в т СО-экв./г и приведённой массы ПГ в т СО<sub>2</sub>-экв./г. При этом следует учитывать, что для каждого  $v$ -го вещества необходимо оценивать его массу  $\Delta M_{vtijr}^{\text{ЗВ ттоп}}$  (т/г), которая могла бы попасть в атмосферу при сжигании  $t$ -го топлива, массу его выбросов  $\Delta M_{vijr}^{\text{ЗВ ут биоотх}}$  (т/г), которые были предотвращены в результате утилизации биомассы, и загрязнение атмосферы  $M_{vijr}^{\text{ЗВ биогаз.ст}}$  (т/г), сопровождающее работу биоэнергетических установок:

$$M_{vtijr}^{\text{экол пот}} = \Delta M_{vtijr}^{\text{ЗВ ттоп}} + \Delta M_{vijr}^{\text{ЗВ ут биоотх}} - M_{vijr}^{\text{ЗВ биогаз.ст}} \quad (13)$$

Масса предотвращённых выбросов и выбросов от биостанций рассчитывается на основе удельных показателей выбросов ЗВ при сжигании  $t$ -х видов ископаемых органических топлив в котлах тепловых электростанций и котельных на 1 кВт·ч выработанной энергии  $N_{vt}^{выбр\ ЗВ\ ттоп}$  (т/кВт·ч), при функционировании животноводческих комплексов на 1 т образующихся ПЖ животных  $N_{vt}^{выбр\ ЗВ\ жив\ компл}$  (т/т), при работе биогазовой станции на 1 кВт·ч производимой электрической энергии  $N_{v,биогаз}^{выбр\ ЗВ\ ттоп}$  (т/кВт·ч). Для расчёта удельных показателей выделения (выбросов) используются соответствующие сертифицированные методики и программные продукты [2, 11, 12]. Для оценки составляющих экологического потенциала удельные показатели выбросов умножаются соответственно на электроэнергетический потенциал биомассы  $10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот}$  объём их образования  $m_{ijr}^{биоотх}$  и количество производимой из биогаза электрической энергии  $10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот}$ :

$$M_{vtijr}^{экол\ пот} = N_{vt}^{выбр\ ЗВ\ ттоп} \cdot 10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот} + N_{vt}^{выбр\ ЗВ\ жив\ компл} \cdot m_{ijr}^{биоотх} - 10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот} \cdot N_{v,биогаз}^{выбр\ ЗВ\ ттоп} \quad (14)$$

Комплексный локальный экологический потенциал замещения  $t$ -го вида топлива на биогаз, производимый из отходов животноводства, для производства энергии оценивается для загрязнения атмосферы в т СО-экв. как:

$$M_{CO_{2ijr}}^{экол\ пот} = \sum_{v \in V_{зв}} A_v^{атм} \cdot M_{vtijr}^{экол\ пот} \quad (15)$$

где  $A_v^{атм}$  – коэффициент относительной агрессивности  $v$ -го ЗВ в атмосферном воздухе [13], равный:

$$A_v^{атм} = \left( \frac{ПДК_{CO} \times ПДК_{рзCO}}{ПДК_{ccv} \times ПДК_{рзv}} \right)^{0,5} \cdot \alpha \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \beta, \quad (16)$$

где  $\alpha, \delta, \lambda, \beta$  – поправочные коэффициенты.

Комплексный глобальный экологический потенциал (по ПГ) замещения  $t$ -го вида топлива на биогаз, производимый из отходов животноводства, для производства энергии оценивается в т СО<sub>2</sub>-экв. как:

$$M_{CO_2ijr}^{экол\ пот} = \sum_{v \in V_{зв}} k_{vCO_2-экв}^{ПГ} \cdot M_{vtijr}^{экол\ пот}, \quad (17)$$

где  $k_{vCO_2-экв}^{ПГ}$  – коэффициент пересчёта массы  $v$ -го ПГ в т СО<sub>2</sub>-экв.

Масса предотвращённых сбросов и сбросов от биоэнергетических станций рассчитывается по сходному алгоритму для каждого ЗВ в отдельности и для всех веществ в эквивалент-

ных по воздействию на окружающую среду тоннах диоксида титана – т TiO<sub>2</sub>-экв./г [13]. В этом случае коэффициент относительной агрессивности  $A_v^{вод}$  для сброса в водные объекты  $v$ -го ЗВ определяется как:

$$A_v^{вод} = ПДК_{рхTiO_2} / ПДК_{рхv} \quad (18)$$

Экологический потенциал, связанный с предотвращением размещения отходов, оценивается как отдельно по классам их опасности, так и суммарно в тоннах эквивалентного по воздействию отхода IV класса опасности. Здесь коэффициент относительной агрессивности отходов  $k$ -го класса опасности может быть задан отношением ставок экологических платежей  $k$ -го класса  $\tilde{Пл}_k^{отх}$  и IV класса опасности  $\tilde{Пл}_{IV}^{отх}$  в ценах базового года (например, 2018 г.):

$$A_k^{отх} = \tilde{Пл}_k^{отх} / \tilde{Пл}_{IV}^{отх} \quad (19)$$

Значения всех экологических потенциалов по видам животных и для разных административно-территориальных единиц могут быть получены суммированием потенциалов  $M_{vtijr}^{экол\ пот}$ ,  $M_{CO_{2ijr}}^{экол\ пот}$ ,  $M_{CO_2tjgr}^{экол\ пот}$  по  $\forall i \in I_{gr}^{видотх}$ ,  $\forall j \in J_r^{виджив}$ ,  $\forall r \in R_s^{рег}$ ,  $\forall f \in F_{рф}^{федокр}$ ,  $\forall f \in F_{рф}^{федокр}$ .

**Продуктовые потенциалы.** Исходный продуктовый потенциал соответствует количеству удобрений, произведённых из отходов животноводческого комплекса:

$$M_{удобijr}^{прод\ пот} = N_{ijr}^{удобр} \cdot m_{ijr}^{биоотх}, \quad (20)$$

где  $N_{ijr}^{удобр}$  – количество удобрений, производимых из одной тонны биомассы.

Все виды потенциалов, оценённые в натуральных единицах, представимы и в стоимостном измерении, т. е. они могут быть преобразованы в соответствующие экономические потенциалы энергетического использования ПЖ сельскохозяйственных животных.

**Экономический потенциал ресурсосбережения** определяют, умножая количество сэкономленного топлива на его планово-заготовительную цену.

**Эколого-экономический потенциал** оценивают в виде произведения экологического потенциала (приведённой массы выбросов, сбросов), удельных ущербов и коэффициентов экологической опасности для реципиентов в зоне влияния источника загрязнения. Предотвращение платежей за негативное воздействие

Таблица 2/ Table 2

Оценка потенциалов энергетического использования биомассы на территории ПФО (фрагмент)  
Assessment of biomass energy utilization potentials in the territory of the Volga Federal District (fragment)

Название показателя The name of the value	Единица измерения Unit of measurement	Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	Республика Мордовия Republic of Mordovia	Республика Татарстан Republic of Tatarstan	...	Саратовская область Saratov Oblast	Пермский край Perm Krai	Приволжский округ Volga Federal District
1	2	3	4	5	...	15	16	17
Энергетические потенциалы / Energy potentials								
Топливный Fuel	млн т у.т./год mln t.s.f/year	0,726	0,183	0,602	...	0,307	0,168	3,480
Электроэнергетический Electric power	млн кВт·ч/год mln kW·h/year	2107,4	532,0	1746,1	...	891,2	486,5	10098,9
Теплоэнергетический Thermal power engineering	млн Гкал/год mln Gcal/year	4,886	1,233	4,048	...	2,066	1,128	23,41
Потенциалы ресурсосбережения – количество сберегаемого топлива Resource saving potentials – the amount of fuel saved								
Природный газ Natural gas	млн м <sup>3</sup> /год mln m <sup>3</sup> /year	629,1	158,8	521,2	...	266,0	145,2	3014,8
Каменный уголь / Coal	млн т/год mln t/year	0,945	0,239	0,783	...	0,400	0,218	4,531
Экологические потенциалы замещения природного газа – предотвращаемые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу / Environmental potentials of natural gas substitution – preventable emissions of pollutants into the atmosphere								
SO <sub>x</sub> (SO <sub>2</sub> )	тыс. т/год thousand t/year	0,006	0,002	0,005	...	0,003	0,001	0,029
NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> )	тыс. т/год thousand t/year	5,033	1,271	4,170	...	2,129	1,162	24,18
CO	тыс. т/год thousand t/year	0,003	0,001	0,003	...	0,001	0,001	0,017
CO <sub>2</sub>	тыс. т/год thousand t/year	1258,2	317,6	1042,5	...	532,1	290,5	6029,6
Приведённая масса Reduced mass	тыс. т CO-экв./год thousand t CO-eq/year	130,8	33,03	108,4	...	55,34	30,21	627,1
Экологические потенциалы замещения каменного угля – предотвращаемая масса выбросов загрязняющих веществ в атмосферу / Ecological coal substitution potentials – the avoidable mass of pollutants released into the atmosphere								
SO <sub>x</sub> (SO <sub>2</sub> )	тыс. т/год thousand t/year	42,54	10,73	35,24	...	17,99	9,822	203,8

## МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> )	тыс. т/год thousand t/ year	9,454	2,386	7,833	...	3,998	2,183	45,30
CO	тыс. т/год thousand t/ year	0,425	0,407	0,352	...	0,180	0,098	2,036
CO <sub>2</sub>	тыс. т/год thousand t/ year	2836,0	715,9	2349,7	...	1199,3	654,7	13590,1
Зола угля Coal ash	тыс. т/год thousand t/ year	283,6	71,59	234,9	...	119,9	65,47	11359,1
Приведённая масса Reduced mass	тыс. т CO-экв./ год thousand t CO-eq/year	57666,4	14557,1	47778,6	...	24387,5	13314,0	276332,1
Экономический потенциал ресурсосбережения – стоимость замещаемого топлива The economic potential of resource saving – the cost of substituted fuel								
Природный газ Natural gas	млн руб./ год mln rub./ year	1714,4	432,8	1420,4	...	725,0	395,8	8215,3
Каменный уголь Coal	млн руб./ год mln rub./ year	1418,0	357,9	1174,8	...	599,6	327,4	6795,1
Эколого-экономические потенциалы - предотвращаемый эколого-экономический ущерб при замещении ископаемого топлива / Ecological and economic potentials – prevented ecological and economic damage caused by the substitution of fossil fuels								
Природный газ Natural gas	млн руб./ год mln rub./ year	457,7	115,5	379,2	...	193,5	105,6	2193,2
Каменный уголь Coal	млн руб./ год mln rub./ year	47229,5	11922,5	39131,5	...	19973,8	10904,4	226321,1

на окружающую среду при размещении отходов рассчитывают путём умножения приведённой массы размещаемых отходов на ставку экологических платежей, применяемую для отходов IV класса опасности [13].

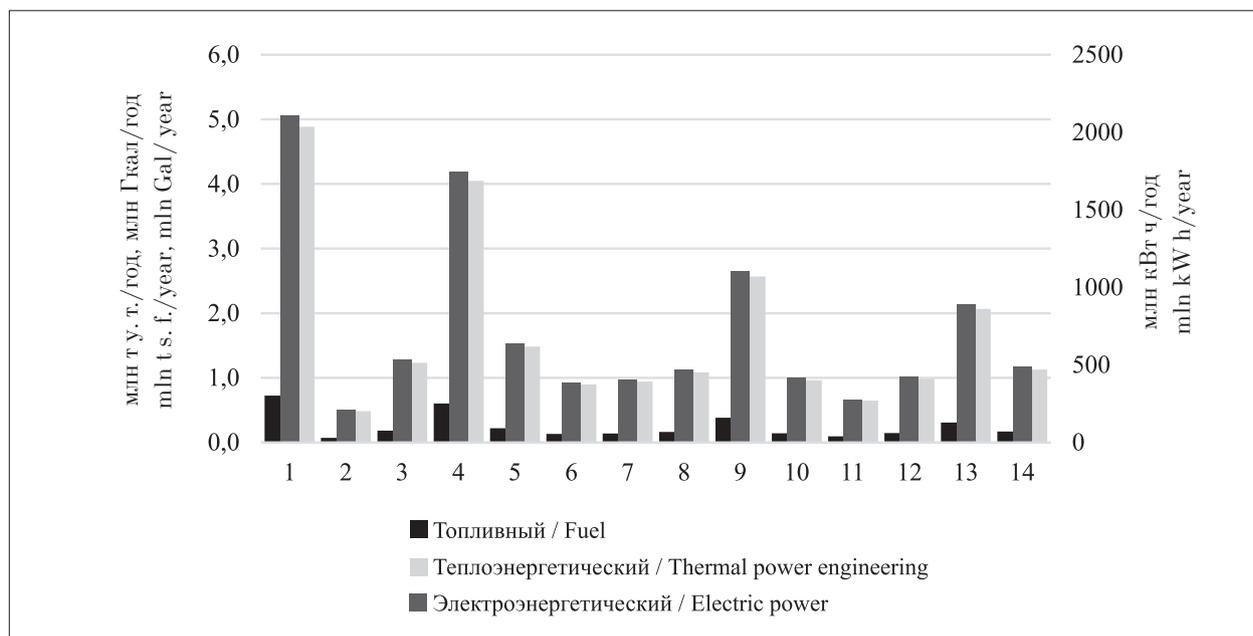
### Результаты и обсуждение

**Инструментарий.** Расчёты потенциалов ПЖ сельскохозяйственных животных проведены с использованием разработанной на кафедре промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева информационно-вычислительной системы (ИВС) «Потенциалы ВИЭ». В настоящее время в ней реализованы блоки для оценки всех рассмотренных выше

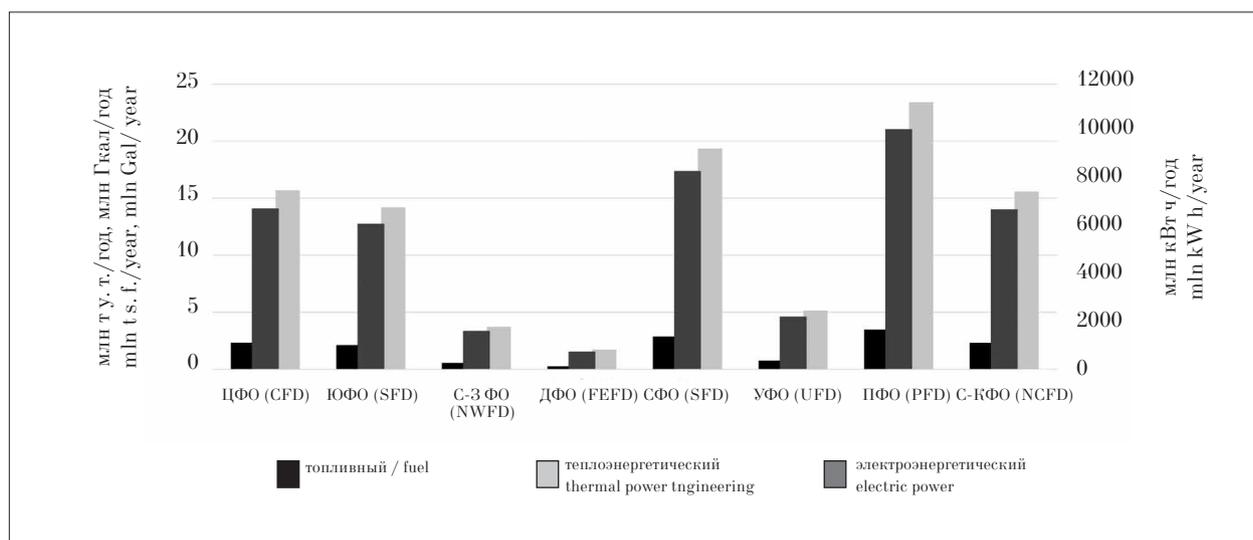
потенциалов энергии солнца, ветра, ПЖ сельскохозяйственных животных, древесных и сельскохозяйственных отходов, твёрдых коммунальных и других органических отходов.

Потенциалы солнечной и ветровой энергии оцениваются путём обработки почасовой статистической информации, собранной за последние 11 лет метеорологическими спутниками NASA и содержащейся в базе данных NASAPOWER. Расчёты осуществляются в узлах географической сетки с шагом 0,25 градуса по меридиану и 0,5 градуса по параллели на всей территории РФ и других стран СНГ.

Потенциалы энергетического использования различных видов органических отходов



**Рис. 2.** Диаграмма топливных, теплоэнергетических и электроэнергетических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных на территории субъектов Приволжского федерального округа РФ: 1 – Республика Башкортостан, 2 – Республика Марий-Эл, 3 – Республика Мордовия, 4 – Республика Татарстан, 5 – Республика Удмуртская, 6 – Республика Чувашская, 7 – Кировская область, 8 – Нижегородская область, 9 – Оренбургская область, 10 – Пензенская область, 11 – Ульяновская область, 12 – Самарская область, 13 – Саратовская область, 14 – Пермский край  
**Fig. 2.** Diagram of fuel, thermal energy and electric power potentials of farm animal waste products on the territory of the Volga Federal District of the Russian Federation: 1 – Republic of Bashkortostan, 2 – Republic of Mari El, 3 – Republic of Mordovia, 4 – Republic of Tatarstan, 5 – Republic of Udmurtia, 6 – Republic of Chuvashia, 7 – Kirov region, 8 – Nizhny Novgorod region, 9 – Orenburg region, 10 – Penza region, 11 – Ulyanovsk region, 12 – Samara region, 13 – Saratov region, 14 – Perm region



**Рис. 3.** Значения топливных, теплоэнергетических и электроэнергетических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных на территории федеральных округов Российской Федерации: ЦФО – Центральный, ЮФО – Южный, С-ЗФО – Северо-западный, ДФО – Дальневосточный, СФО – Сибирский, УФО – Уральский, ПФО – Приволжский, С-КФО – Северо-Кавказский  
**Fig. 3.** Values of fuel, thermal energy and electric power potentials of farm animal waste products in the territory of the Federal Districts of the Russian Federation: CFD – Central, SFD – Southern, NWFD – Northwestern, FEFD – Far Eastern, SFD – Siberian, UFD – Ural, PFD – Volga, NCFD – North Caucasian

рассчитываются в рамках городов, районов, субъектов Федерации, федеральных округов, страны в целом.

Математическое и информационное обеспечение ИВС реализуется в программной среде Excel, с помощью языков программирования SQL и Python.

**Пример использования методики оценки потенциалов биомассы.** Рассмотренная выше методика оценки потенциалов энергетического использования биомассы животноводства применена в разработанной ИВС. Данная система, с дифференциацией по административно-территориальным единицам, позволяет хранить исходную информацию, проводить оценку потенциалов, хранить результаты этой оценки. Предусмотрена возможность изменения любого массива исходных данных в связи с появлением более свежей статистической информации, а также автоматического пересчёта потенциалов.

В таблице 2 представлен пример оценки потенциалов при замещении в энергетическом процессе природного газа и каменного угля биогазом, полученным из ПЖ сельскохозяйственных животных на территории Приволжского федерального округа (ПФО).

Для наглядности на рисунке 2 приводятся результаты расчёта энергетических потенциалов для всех субъектов ПФО.

Потенциалы рассчитаны для субъектов Федерации и федеральных округов России. На рисунке 3 можно ознакомиться с результатами оценки тепловых, теплоэнергетических и топливных потенциалов во всех федеральных округах РФ.

Результаты оценки потенциалов биомассы ПЖ сельскохозяйственных животных и различных видов органических отходов могут служить информационной основой для эколого-экономического обоснования программ развития этого сектора распределённой возобновляемой энергетики [14]. Выбор эффективных направлений инвестирования средств в системы энергоснабжения на основе таких видов повлечёт за собой:

- уменьшение локального загрязнения окружающей среды;
- снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха ПГ по стране в целом;
- сокращение расхода пресной воды;
- отказ от использования ископаемых углеводородов – ценнейшего сырья для нефте- и газохимической промышленности;
- уменьшение объёмов и соответственно затрат на транспортировку дорогостоящего

топлива в удалённые и труднодоступные районы;

- резкое сокращение стоимости инженерных коммуникаций за счёт радикального уменьшения протяжённости линий электропередач и теплотрасс с соответствующим снижением потерь при передаче энергии, эксплуатационных и ремонтных издержек;
- увеличение энергообеспеченности и надёжности энергоснабжения населённых пунктов;
- понижение тарифов на энергию для конечных потребителей, улучшение условий жизни населения.

### Заключение

Рассмотренная система потенциалов отличается от существовавших ранее [15] включением в неё ресурсосберегающих, экологических, эколого-экономических потенциалов, позволяющих проводить эколого-экономическое обоснование инвестирования средств в строительство биогазовых энергетических комплексов по переработке продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных как одного из возможных направлений их утилизации. Результаты оценки могут быть использованы для решения задачи оптимизации проектных решений в этой области на стадии обоснования инвестиций. Экономико-математические модели, необходимые для поиска таких решений, в настоящее время разрабатываются.

### References

1. Agriculture in Russia. 2023: Data book / Eds. I.V. Vasiliev, N.A. Alimova, S.V. Kiselev, M.P. Klevakina, E.E. Obychayko, A.V. Petrikov, A.V. Ukolova, A.N. Usachev, O.V. Kharina. Moskva: Rosstat, 2023. 103 p. (in Russian).
2. Temporary recommendations on the calculation of emissions of pollutants into the atmospheric air from livestock and poultry facilities. Sankt-Peterburg: JSC “Scientific Research Institute Atmosphere”, 2015. 29 p. (in Russian).
3. Rosprirodnadzor Order No. 242 dated 22.05.2017 (as amended on 18.01.2024) “On approval of the Federal Classification Catalog of Waste” (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 08.06.2017 No. 47008) [Internet resource] [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_218071/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218071/) (Accessed: 20.02.2024).
4. Sinelnikov M. By-products are not waste // Zhivotnovodstvo Rossii. 2023. No. 2 [Internet resource] <https://zsr.ru/zsr-2023-02-003?ysclid=m3zrwd1hdr817596153> (Accessed: 29.02.2024) (in Russian).

5. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashimkhina T.Ya. Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 219–225 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225
6. The main indicators of environmental protection. *Statistical Bulletin*. Moskva: Federal State Statistics Service (ROSSTAT), 2023. 105 p. (in Russian).
7. Maksishko L.M. Eco-friendly technology for the processing of livestock manure waste with greenhouse gas absorption // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 205–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-205-209
8. Sazanov A.V., Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashimkhina T.Ya., Kozvonin V.A. Production of bioorganomineral fertilizers as the direction of realization of waste-free technologies in pig-breeding // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 3. P. 85–90 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-085-090
9. Ermolenko B.V., Ermolenko G.V., Proskuryakova L.N. Renewable energy technological potential assessment for evidence-based policy-making // *Emerging technologies for economic development. Science, technology and innovation studies* / Eds. D. Meissner, L. Gokhberg, O. Saritas. Springer, Cham, 2019. P. 107–129. doi: 10.1007/978-3-030-04370-4\_5
10. Resolution of the State Statistics Committee No. 46 dated 23.06.1999 “On approval of methodological provisions for calculating the fuel and Energy Balance of the Russian Federation in accordance with international practice” [Internet resource] <https://base.garant.ru/180728/> (Accessed: 17.01.2024) (in Russian).
11. Methodology for determining gross emissions of pollutants into the atmosphere from thermal power plants and boiler houses. Moskva: STO JSC Mosenergo, 2013. 35 p. (in Russian).
12. Methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour. Moskva: JSC “VTI”, 1998. 65 p. (in Russian).
13. Ermolenko B.V., Filimonova N.D. Ecological-economic preconditions for organization of energy supply when pumping oil and oil products using renewable energy sources // *Automation, telemechanization and communication in oil industry*. 2019. No. 5. P. 44–52 (in Russian). doi: 10.33285/0132-2222-2019-5(550)-44-52
14. Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. Renewable energy in decentralized power supply. Moskva: Ergoatomizdat, 2008. 231 p. (in Russian).
15. Handbook on renewable energy resources in Russia and local fuels (indicators by territory) / Ed. P.P. Bezrukikh. Moskva: IAC Energia, 2007. 272 p. (in Russian).

## Исследование возможности регенерационной утилизации отработанных электролитов меднения

© 2024. 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., И. С. Казанцева, н. с.,  
Н. Н. Пастухова, аспирант, И. К. Аверкиев, м. н. с.,  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
426067, Россия, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34,  
e-mail: shumilovama@udman.ru

Проведено исследование возможности регенерационной утилизации отработанного раствора меднения промышленного предприятия г. Ижевска. В основу процесса был положен реагентный метод с применением в качестве веществ-осадителей растворов гидроксида натрия и карбоната натрия. Методами ИК-спектроскопии и синхронного термического анализа установлено, что при взаимодействии ионов меди с гидроксидом натрия образуется гидроксид меди(II), а с карбонатом натрия – дигидроксидкарбонат меди(II) – аналог природного материала азурита. Необходимое количество осадителя определяли методом потенциометрического титрования; установлено молярное соотношение для реагентов. Проведено моделирование технологической схемы регенерационной утилизации отработанных растворов меднения с получением новых рабочих электролитов, которые были подвергнуты испытаниям на качество наносимого медного покрытия. Оценка качества производимого медного покрытия показала, что раствор щёлочи является оптимальным вариантом для регенерации растворов меднения.

**Ключевые слова:** отработанный раствор меднения, регенерационная утилизация, ИК-спектроскопия, синхронный термический анализ, гидроксид меди(II), дигидроксидкарбонат меди(II).

## Study of the possibility of regenerative recycling of waste copper plating electrolytes

© 2024. М. А. Shumilova ORCID: 0000-0001-5582-0258<sup>?</sup>  
F. F. Chausov ORCID: 0000-0003-4950-2370<sup>?</sup> D. K. Zhirov ORCID: 0000-0003-4475-8561<sup>?</sup>  
I. S. Kazantseva ORCID: 0000-0002-3091-1513<sup>?</sup> N. N. Pastukhova ORCID: 0009-0007-6031-9821<sup>?</sup>  
I. K. Averkiev ORCID: 0000-0001-9952-8363<sup>?</sup>  
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

The possibility of regenerative recycling of waste copper plating solution was studied. The process was based on the reagent method using 10% solutions of sodium hydroxide and sodium carbonate as precipitants. The required amount of precipitant was determined by potentiometric titration. We found that the molar ratio between the precipitant and copper ions is 2.2 to 1. The optimal pH value for solutions during precipitation with alkali was 11, and for soda solution – 10. The degree of metal ions extraction from the waste copper plating electrolyte in these conditions exceeds 99%. By methods of IR spectroscopy and simultaneous thermal analysis, it was established that the interaction of copper ions with alkali produces copper(II) hydroxide, and with sodium carbonate – copper(II) dihydroxycarbonate (an analog of the natural material azurite). A simulation of the technological scheme for the regenerative recycling of waste copper plating solutions with the obtaining of new working electrolytes was carried out. Copper coatings applied to steel products using the resulting alkali working solutions satisfy the production requirements. Based on the experimental data obtained the disposal of 1 m<sup>3</sup> of waste copper plating solutions required about 62 kg of sodium hydroxide or 26 kg of sodium carbonate. Economic calculations have shown that the cost of copper sulfate returned to production is almost 2 times higher than the cost of alkali and acid and 2.1 times higher than the cost of sodium carbonate and sulfuric acid. Taking into account the quality of the applied copper coating the most appropriate option is the regenerative recycling of waste copper plating solutions using alkali.

**Keywords:** waste copper plating solution, regenerative recycling, IR spectroscopy, simultaneous thermal analysis, copper(II) hydroxide, copper(II) dihydroxycarbonate.

Процессы электрохимического нанесения медного покрытия на поверхность изделия сопровождаются достаточно высокими потерями солей металла из отработанных растворов меднения за счёт их сброса на очистные сооружения. Отработанные электролиты, образующиеся в больших количествах на гальваническом производстве, являются высококонцентрированными растворами (содержание основных компонентов доходит до 200–250 г/дм<sup>3</sup>) и поэтому представляют значительную угрозу для окружающей среды при их несанкционированном сливе [1, 2]. С другой стороны, они являются вторичными источниками получения многих цветных металлов, высокая стоимость и дефицитность которых делают задачу утилизации отработанных электролитов из отходов производства чрезвычайно актуальной [3, 4]. Общими недостатками существующих технологий извлечения ионов меди являются применение дорогостоящих реагентов и оборудования, сложность эксплуатации [5–8].

Суть предлагаемой электрохимической регенерации раствора химического осаждения меди [5] заключалась в растворении медного анода в отработанном электролите и поступлении вновь приготовленного раствора в рабочую ванну. Редуцирование меди из промывных вод и элюатов сернокислого меднения, предложенное в работе [6], включает процессы фильтрации, сорбции, химической обработки, ионного обмена и электролиза. Предлагаемый авторами работы [7] метод позволяет вернуть в производство медь из отработанного медно-аммиачного раствора за счёт выделения в виде осадка гидроксида меди (II) и получить азотосодержащее удобрение в результате введения в фильтрат раствора, содержащего гидроксид натрия, гидрофосфат натрия и хлорид или сульфат магния, для образования магнийаммонийфосфата. Недостатками ионообменного метода очистки сточных вод от тяжёлых металлов (ТМ) являются требования предварительного отделения органики, значительных капиталовложений и затрат, при этом метод эффективен только для низких концентраций ТМ [8]. При использовании установки электродиализа и обратного осмоса для удаления ТМ из промышленных стоков также возникают проблемы, связанные с большими материальными затратами, квалификацией специалистов и сложностью использования оборудования. В этих методах не удаляются примесные ионы, поступающие в электролит во время работы, что ухудшает качество наносимых покрытий.

В настоящее время наиболее простым и широко применяемым является реагентный метод очистки отходов гальванического производства, основанный на образовании нерастворимых соединений, выпадающих в осадок. Однако, несмотря на лёгкость и кажущуюся простоту, у метода имеются существенные недостатки: необходимо утилизировать осадок, который с течением времени требует всё больших площадей. В связи с этим внедрение технологии регенерационной утилизации отработанного раствора меднения, приводящей к образованию его малорастворимых соединений за счёт взаимодействия с реагентом-осадителем, из которых можно получить новые востребованные в различных производствах продукты, является весьма перспективным. Кроме того, важно добиться минимального захвата примесных ионов осаждаемыми формами соединений меди, что позволяет впоследствии получить регенерированный рабочий раствор более высокого качества.

Целью работы является поиск наиболее рациональных подходов к разработке метода и установлению оптимальных условий регенерационной утилизации отработанного кислого электролита меднения щелочными реагентами с получением новых рабочих растворов без образования трудно утилизируемых гальваношламов.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования при разработке схемы утилизации был отработанный раствор меднения кислый (ОРМ) АО «ИЭМЗ «Купол», рабочий раствор которого содержит медный купорос 120–240 г/дм<sup>3</sup> и серную кислоту 50–100 г/дм<sup>3</sup>.

При выборе реагента-осадителя руководствовались следующими положениями: образующийся осадок должен легко растворяться в соответствующем реагенте для дальнейшего перевода в востребованный продукт: новый рабочий электролит или ингибитор коррозии, либо фунгицид и т. д., при этом остаточное содержание ионов меди в растворе после осаждения должно приближаться к нормируемым показателям для промышленных стоков. В представленной работе реагентами-осадителями были выбраны 10% растворы гидроксида и карбоната натрия, способные переводить  $\text{Cu}^{2+}$  в малорастворимые гидроксо-соединения, которые затем легко растворяются в растворе серной кислоты при комнатной температуре с образованием сульфата. Выбор

концентрации обусловлен лёгкостью приготовления такого раствора как в лабораторных, так и в заводских условиях; при этом мольное соотношение  $\text{Cu(II)}:\text{реагент} \approx 1:2$ . Для определения расхода реагентов снимались кривые потенциометрического титрования, выполненные на лабораторном ионномере И-160МИ со стеклянным (ЭС-10603) и хлорсеребряным (ЭСр-10103) электродами.

Концентрацию ионов меди в виде аммиакатов в надосадочной жидкости определяли спектрофотометрическим методом на КФК-З-«ЗОМЗ» (ЗОМЗ, Россия) [9]. Представленные концентрации являются средними величинами для трёх аналитических повторностей; значение относительного стандартного отклонения находится в пределах 4,5%. Степень извлечения (СИ) ионов металла рассчитывали по формуле:

$$\text{СИ} = \frac{C_{\text{нач}} - C_{\text{ост}}}{C_{\text{нач}}} \cdot 100\%,$$

где  $C_{\text{нач}}$  и  $C_{\text{ост}}$  – начальная и остаточная концентрации меди(II) в пробе.

При осаждении ионов меди щёлочью в осадке гидроксида меди(II) могут содержаться примеси оксида меди(II); а при воздействии кальцинированной содой возможно осаждение смеси гидрокарбонатов меди  $\text{Cu}_x(\text{OH})_y(\text{CO}_3)_z$  переменного состава  $x:y:z$ , в которой присутствуют примеси гидросульфатов меди и двойных карбонатов меди и натрия. Наличие примесей в осадке может ухудшать чистоту регенерируемого на основе полученных осадков сульфата меди и получаемых из него электролитов, поэтому необходимо изучить состав образующихся осадков для создания качественных рабочих электролитов меднения.

Микроскопические исследования и элементный анализ осадков проводили, используя сканирующий электронный микроскоп Thermo Fisher Scientific Quattro S, оснащённый системой энергодисперсионного микроанализа на основе спектрометра EDAX «Octane Elect Plus EDS System» (США).

Идентификацию полученных осадков осуществляли по их инфракрасным спектрам, снятым на ИК-спектрометре с Фурье-преобразованием ФСМ 1202 (ООО «Инфраспек», Россия) в виде кривых пропускания  $T, \% - \nu$  в области  $400-4000 \text{ см}^{-1}$  относительно воздуха. Разрешение спектров составляло  $1 \text{ см}^{-1}$ , суммирование осуществлялось по 16 сканам. Подготовка исследуемых образцов осадков для спектроскопических исследований за-

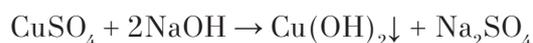
ключалась в прессовании таблеток, содержащих по 1 мг осадка и 250 мг КВг квалификации «осч».

Термогравиметрический и дифференциально-термический анализ проводили на приборе «Shimadzu-DTG-60H» (Shimadzu, Япония) в температурном интервале  $25-500 \text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфере аргона со скоростью нагрева  $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$ .

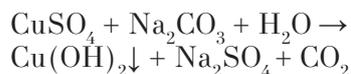
Для определения толщины нанесённого медного покрытия готовили шлифы, зажимая изделия в струбцину и обрабатывая на шлифовальной бумаге с возрастанием зернистости от 1000 до 2000, которые затем анализировали на металлографическом агрегатном микроскопе МЕТАМ-Р1 (ЛМО, Россия). Представленные результаты являются средними для трёх измерений; величина относительного стандартного отклонения не превышает 5%.

## Результаты и обсуждение

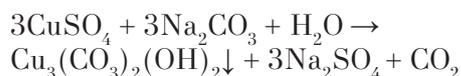
При использовании в качестве осадителя ионов меди щёлочи (гидроксида натрия) основная реакция имеет вид:



Если осадителем является раствор карбоната натрия, то согласно теории гидролиза, в результате совместного взаимодействия должно происходить образование гидроксида меди:

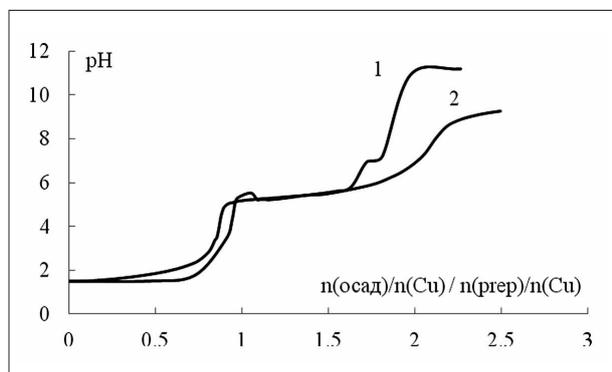


Однако в действительности основная реакция протекает по схеме с образованием преимущественно дигидроксидкарбоната меди:



и в качестве примесей – двойных солей  $\text{CuNa}_2(\text{CO}_3)_2$  и  $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$ .

Для определения расхода каждого осадителя на нейтрализацию ОРМ и установления оптимальной величины pH реакции осаждения были сняты кривые потенциометрического титрования (рис.); точки эквивалентности устанавливали дифференциальным методом. Необходимость проведения потенциометрии обусловлена тем, что расход реагентов не поддается теоретическому расчёту, поскольку реагентная нейтрализация ОРМ осложнена наличием в его составе серной кислоты,



**Рис.** Кривые потенциометрического титрования ОРМ: 1 – 10% NaOH, 2 – 10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>  
**Fig.** Potentiometric titration curves of waste copper plating solution: 1 – 10% NaOH, 2 – 10% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

а также протеканием побочных процессов образования гидроксокомплексов меди с ростом рН, что увеличивает количество осадителя.

Согласно экспериментальным данным, при осаждении ионов меди (II) раствором щёлочи мольное соотношение компонентов  $n(\text{OH}^-):n(\text{Cu}^{2+})=2,2:1$ . Согласно литературным данным [10], величина рН начала осаждения гидроксида меди (II) равна 5,5, поэтому для определения оптимальной величины рН исследуемого процесса в интервале от 5,5 до 11 было произведено осаждение  $\text{Cu}^{2+}$  при постоянном перемешивании при комнатной температуре. Полученный щелочным осаждением  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  оставляли для старения на 0,5 ч, поскольку при более длительном выдерживании под маточным раствором он чернеет вследствие дегидратации до  $\text{CuO}$ . Выделенный осадок отделяли от раствора фильтрованием на фильтре «синяя лента», который промывали дистиллированной водой до отрицательной реакции на сульфат-ионы и затем сушили при комнатной температуре. Морфологически

продукт представляет собой кристаллический осадок, имеющий элементный состав, масс. %: найдено –  $\text{Cu} - 65,3, \text{O} - 33,1$ ; вычислено для  $\text{Cu}(\text{OH})_2 - \text{Cu} - 64,95, \text{O} - 33,00$ . Отклонения свидетельствуют о частичной потере конституционной воды. Согласно экспериментальным данным по остаточному содержанию металла в фильтрате и степени его извлечения, представленным в таблице 1, практически полное осаждение ионов меди происходит при рН 11, данная величина была положена в основу технологической схемы регенерационной утилизации ОРМ.

Полученный осадок гидроксида меди был исследован методом ИК-спектроскопии: отнесение полос поглощения с характерными для определённых групп атомов волновыми числами (табл. 2) осуществляли согласно данным [11–13], которые подтверждают, что в его составе преобладает гидроксид меди. Появление в ИК-спектре полос поглощения, характерных для валентных колебаний  $\text{CO}_3$ -группы, обусловлено карбонизацией осадков гидроксида меди при контакте с атмосферой и наличием карбоната натрия в качестве примеси в составе гидроксида натрия [13]. Данные синхронного термического анализа фиксируют значительный эндотермический эффект в диапазоне температур 120–200 °С, соответствующий удалению воды в 26,2% по массе; что подтверждает протекание процесса разложения  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  до  $\text{CuO}$  и согласуется с имеющимися литературными данными [14]. ИК-спектр вещества (табл. 2), оставшегося после термического разложения осадка, находится в соответствии с вышеизложенными выводами, поскольку наиболее значительной полосой поглощения являются валентные колебания  $\nu(\text{Cu}-\text{O})$  в виде плеча с частотами 489

**Таблица 1 / Table 1**

Извлечение ионов  $\text{Cu}^{2+}$  из ОРМ в зависимости от рН  
 Extraction of  $\text{Cu}^{2+}$  from waste copper plating solution depending on рН

Осадитель / Precipitator	10% NaOH							
	рН	5,5	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0
$C_{\text{ост}} \cdot 10^3, \text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$		0,3673	0,0652	0,0145	0,0055	0,0083	0,0071	0,0018
$C_{\text{residual}} \cdot 10^3, \text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$								
Степень извлечения, % Extent of extraction, %		16,22	85,13	96,69	97,93	98,10	98,38	99,60
Осадитель / Precipitator	10% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>							
	рН	5,5	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	
$C_{\text{ост}}, \text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$		0,4051	0,0289	0,0274	0,0266	0,0259	0,0259	
$C_{\text{residual}}, \text{г} \cdot \text{дм}^{-3}$								
Степень извлечения, % Extent of extraction, %		90,75	99,34	99,37	99,39	99,41	99,41	

Таблица 2 / Table 2

Характеристика ИК-спектров осадков / Characteristics of IR spectra of sediments

Вид колебания Type of oscillation	Волновое число осадков $\nu$ , $\text{cm}^{-1}$ / Wave number of sediments $\nu$ , $\text{cm}^{-1}$ ,	
	Реагент NaOH / Reagent NaOH	Реагент $\text{Na}_2\text{CO}_3$ / Reagent $\text{Na}_2\text{CO}_3$
$\nu(\text{O-H})$	3598	3400
$\delta \text{OH}$	–	851
$\nu_{\text{antysymmetry}}(\text{SO}_4)$	1090	–
$\nu(\text{CO}_3)$	1458, 1367	1622, 1458, 1378, 755, 736, 834
$\delta(\text{O-Cu-O})$	756	–
$\delta(\text{Cu-O-H})$	701	–
$\nu(\text{Cu-O})$	460	460, 498

Примечание: прочерк обозначает отсутствие данного вида колебаний.  
Note: the dash indicates the absence of this type of oscillation.

и  $575 \text{ cm}^{-1}$  на полосе колебаний  $\text{Cu-O}$ . Таким образом, вычисленное на основе полученных экспериментальных данных количество NaOH, необходимое для осаждения меди в виде  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  при pH 11, составляет около 62 кг на  $1 \text{ m}^3$  ОРМ.

При использовании в качестве реагента-осадителя карбоната натрия мольное соотношение компонентов равняется  $n(\text{CO}_3^2):n(\text{Cu}^{2+}) = 2,2:1$  (рис.). Для оценки эффективности удаления ионов меди из ОРМ за счёт образования гидрокарбоната меди было исследовано влияние величины pH (табл. 1). Как следует из экспериментальных данных, практически полное извлечение ионов металла карбонат-ионом происходит уже при pH 6, что обусловлено величиной константы растворимости  $K_s(\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2) = 4,1 \cdot 10^{-55}$ , которая фактически на 30 порядков меньше  $K_s(\text{Cu}(\text{OH})_2) = 2,2 \cdot 10^{-20}$  [15]. Осадок, полученный в результате медленного по каплям сливания реагентов при постоянном перемешивании, оставляли на сутки для старения, затем переносили на фильтр и промывали до полного удаления сульфат-ионов и сушили при комнатной температуре в эксикаторе. Выделенное вещество имело зеленовато-голубой цвет, мелкокристаллическую структуру и следующий элементный состав, масс. %: найдено – Cu – 36,5; C – 8,2; O – 33,6; Na – 10,2; S – 5,5; вычислено для  $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$  – Cu – 55,10; C – 7,00; O – 37,32. Отклонения свидетельствуют о захвате ионов натрия и сульфат-ионов при осаждении.

ИК-спектр полученного дигидроксодикарбоната меди (табл. 2) находится в полном соответствии с имеющимися литературными данными. Полосу поглощения  $3432 \text{ cm}^{-1}$  относят к валентным колебаниям O–H в молекулах воды и в гидроксогруппах [12]. Асимметричным валентным колебаниям карбонат-ионов

( $\nu_3$ ), их деформационным колебаниям в плоскости симметрии ( $\nu_4$ ) и перпендикулярно ей ( $\nu_2$ ) соответствуют наборы полос поглощения с максимумами  $1622, 1458, 1378 \text{ cm}^{-1}$ ;  $755, 736 \text{ cm}^{-1}$ ;  $834 \text{ cm}^{-1}$ , соответственно [16]. Полосы поглощения ( $498, 460 \text{ cm}^{-1}$ ) характеризуют валентные колебания связи  $\text{Cu-O}$  [16].

По данным термического анализа в интервале от  $90$  до  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  зафиксирован эндоэффект, соответствующий потере 6% по массе воды; при дальнейшем увеличении температуры до  $335 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит удаление 11,2% (масс.) углекислого газа без теплового эффекта. В диапазоне  $335\text{--}350 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается эндотермический эффект, отвечающий удалению из образца дигидроксодикарбоната меди (II) 14,4% (масс.)  $\text{CO}_2$ . Остаток вещества был подвергнут ИК-спектральному анализу (табл. 2): наличие полос поглощения при  $520$  и  $1120 \text{ cm}^{-1}$  указывают на различные виды колебаний связи  $\text{Cu-O}$ . Полоса поглощения при  $1420 \text{ cm}^{-1}$  соответствует  $\delta(\text{OH})$ . Широкая высокочастотная полоса поглощения при  $3422 \text{ cm}^{-1}$  принадлежит антисимметричным валентным колебаниям связи O–H [12, 13]. Таким образом, полученный в результате реакции осаждения дигидроксодикарбонат меди (II) при нагревании отщепляет сперва конституционную воду, а затем – углекислый газ, переходя в оксид меди. Расчёты, произведённые на основе экспериментальных данных, показали, что для утилизации  $1 \text{ m}^3$  ОРМ требуется порядка 26 кг карбоната натрия.

Предлагаемая схема утилизации ОРМ с учётом проведённого эксперимента такова: накопление ОРМ с усреднением состава → нейтрализация смеси ОРМ, приливая по каплям 10% раствор NaOH или  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  при постоянном перемешивании → старение осадка в течение часа с последующей его фильтрацией → 5-кратная отмывка осадка

водой до отрицательной реакции на сульфат-ионы → высушивание осадка при комнатной температуре в течение суток → растворение осадка в слабом растворе серной кислоты для последующего приготовления новых растворов меднения в соответствии с ГОСТ 9.305-84. Эти рабочие растворы были испытаны на качество наносимого медного покрытия на стальные изделия. Установлено, что покрытие, полученное при использовании в качестве реагента щёлочи, имело вид медного зеркала с толщиной 25 мкм, характеризующегося хорошей адгезией, что указывает на его прочное сцепление с базовой поверхностью и отвечает по качеству требованиям производства. В рабочих растворах меднения, приготовленных с использованием карбоната натрия, на изделия получено матовое покрытие с толщиной 10 мкм, что не соответствует требуемым показателям качества. Как мы полагаем, ухудшение качества покрытия обусловлено наличием примесей гидросульфатов и двойных солей меди в сульфате меди, используемом для приготовления электролита.

Наиболее целесообразным является процесс регенерационной утилизации ОРМ с использованием в качестве осадителя гидроксида натрия: он обеспечивает большее содержание меди в концентрате (65 масс. % против 55 масс. % при осаждении карбонатом натрия), большую чистоту получаемого концентрата (отсутствие примесей серы и натрия) и, как следствие, более высокое качество получаемого электролита и наносимого медного покрытия.

### Заключение

Определены оптимальные условия осаждения ионов меди из отработанного кислого электролита меднения с применением растворов гидроксида натрия и карбоната натрия: для раствора щёлочи величина рН равна 11 и степень извлечения ионов меди превышает 99%; при использовании раствора соды степень извлечения превышает 99% уже при значении рН 6,0. Методами ИК-спектроскопии и синхронного термического анализа установлен состав образующихся осадков: осаждение ионов меди гидроксидом натрия приводит к образованию гидроксида меди(II); при реакции с раствором карбоната натрия в осадок выпадает дигидроксидкарбонат меди(II) с примесями гидросульфатов и двойных солей меди(II).

На основании опытов с реальными растворами ОРМ определён необходимый расход

щёлочи и карбоната натрия для осаждения ионов меди из отработанного электролита. Предложена технологическая схема утилизации ионов меди из ОРМ в виде её сульфата как основы для приготовления нового рабочего электролита кислого меднения, в котором получены качественные медные покрытия. Рассмотренный вариант переработки гальванических отходов без шламообразования позволяет производить востребованные товарные продукты, одновременно снижая негативное воздействие гальванического производства на окружающую среду.

### Литература

1. Трейман М.Г. Современное гальваническое производство и его экологизация // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 9. С. 15–17.
2. Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Гусева Т.В. Гальваническое производство в России: оценочный подход, задачи повышения ресурсной и экологической эффективности // Технология металлов. 2020. № 7. С. 2–6. doi: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-2-6
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. Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Кантор Г.Я. Получение неорганических пигментов из отходов гальванических производств // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 22–29. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-022-029
5. Turaev D.Yu., Kruglikov S.S. Regeneration of a solution for electroless copper plating // Russ. J. Appl. Chem. 2005. V. 78. No. 4. P. 579–583. doi: 10.1007/s11167-005-0345-5
6. Плохов С.В., Михаленко М.Г. Рекуперация ионов металла промывных вод кислого меднения методами ионного обмена и электролиза // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2002. Т. 45. № 5. С. 161–163.
7. Перельгин Ю.П., Зуева Т.В., Зорькина О.В. Реагентная технология утилизации медно-аммиачного раствора травления печатных плат // Водоочистка. 2017. № 10. С. 72–76.
8. Измайлова А.Р., Рустамова А.И. Технологии обезвреживания сточных вод гальванического производства // E-Scio. 2020. № 4 (43). С. 516–519.
9. Подчайнова В.Н., Симонова Л.Н. Медь. М.: Наука, 1990. 279 с.
10. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1979. 480 с.
11. Накамото К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений. М.: Мир, 1991. 536 с.

12. Raul P.K., Senapati S., Sahoo A.K., Umlong I.M., Devi R.R., Thakur A.J., Veer V. CuO nanorods: a potential and efficient adsorbent in water purification // RSC Adv. 2014. V. 4. No. 76. P. 40580–40587. doi: 10.1039/c4ra04619f

13. Шуйский А.В., Зорина М.Л. Инфракрасные спектры природного и выращенного малахитов // Журнал прикладной спектроскопии. 2013. Т. 80. № 4. С. 591–595.

14. Fukuda M., Koga N. Kinetics and mechanisms of the thermal decomposition of copper(II) hydroxide: a consecutive process comprising induction period, surface reaction, and phase boundary-controlled reaction // J. Phys. Chem. C. 2018. V. 122. No. 24. P. 12869–12879. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b03260

15. Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А. Константы неорганических веществ: справочник. М.: Дрофа, 2008. 685 с.

16. Schmidt M., Lutz H.D. Hydrogen bonding in basic copper salts: a spectroscopic study of malachite,  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ , and brochantite,  $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$  // Phys. Chem. Minerals. 1993. V. 20. No. 1. P. 27–32. doi: 10.1007/bf00202247

## References

1. Treiman M.G. Modern galvanic production and its greening // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2009. No. 9. P. 15–17 (in Russian).

2. Vinokurov E.G., Burukhina T.F., Guseva T.V. Galvanic industry in Russia: assessment approach, improvement tasks of resource and environmental effectiveness // Tekhnologiya metallov. 2020. No. 7. P. 2–6 (in Russian). doi: 10.31044/1684-2499-2020-0-7-2-6

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. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Obtaining inorganic pigments from galvanic waste // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 22–29 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-022-029

5. Turaev D.Yu., Kruglikov S.S. Regeneration of a solution for electroless copper plating // Russ. J. Appl. Chem. 2005. V. 78. No. 4. P. 579–583. doi: 10.1007/s11167-005-0345-5

6. Plokhov S.V., Mikhalenko M.G. Recovery of metal ions from acid copper plating wash waters by ion exchange and electrolysis methods // Izvestija Vuzov. Khimiya i Khimicheskaya tekhnologiya. 2002. V. 45. No. 5. P. 161–163 (in Russian).

7. Pereygin Yu.P., Zueva T.V., Zor'kina O.V. Reagent technology for utilization of copper-ammonia solution from printed circuit board etching // Vodoochistka. 2017. No. 10. P. 72–76 (in Russian).

8. Izmaylova A.R., Rustamova A.I. Technologies for neutralization of wastewater from galvanic production // E-Scio. 2020. No. 4 (43) P. 516–519 (in Russian).

9. Podchainova V.N., Simonova L.N. Copper. Moskva: Nauka, 1990. 279 p. (in Russian).

10. Lurie Yu.Yu. Handbook of analytical chemistry. Moskva: Khimiya, 1979. 480 p. (in Russian).

11. Nakamoto K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. Moskva: Mir, 1991. 536 p. (in Russian).

12. Raul P.K., Senapati S., Sahoo A.K., Umlong I.M., Devi R.R., Thakur A.J., Veer V. CuO nanorods: a potential and efficient adsorbent in water purification // RSC Adv. 2014. V. 4. No. 76. P. 40580–40587. doi: 10.1039/c4ra04619f

13. Shuysky A.V., Zorina M.L. Infrared spectra of natural and synthetic malachites // Zhurnal prikladnoy spektroskopii. 2013. V. 80. No. 4. P. 591–595 (in Russian).

14. Fukuda M., Koga N. Kinetics and mechanisms of the thermal decomposition of copper(II) hydroxide: a consecutive process comprising induction period, surface reaction, and phase boundary-controlled reaction // The Journal of Physical Chemistry C. 2018. V. 122. No. 24. P. 12869–12879. doi: 10.1021/acs.jpcc.8b03260

15. Lidin R.A., Andreeva L.L., Molochko V.A. Constants of inorganic substances: handbook. Moskva: Drofa Publ., 2008. 685 p. (in Russian).

16. Schmidt M., Lutz H.D. Hydrogen bonding in basic copper salts: a spectroscopic study of malachite,  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ , and brochantite,  $\text{Cu}_4(\text{OH})_6\text{SO}_4$  // Phys. Chem. Minerals. 1993. V. 20. No. 1. P. 27–32. doi: 10.1007/bf00202247

## Антифунгальная защита строительных материалов производными гуминовых кислот в оценке АТФ-метрией

© 2024. О. В. Сенько, к. х. н., н. с.,

Н. А. Степанов, к. т. н., н. с.,

О. В. Маслова, к. х. н., с. н. с.,

Е. Н. Ефременко, д. б. н., профессор, зав. лабораторией,

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,

119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1/3,

e-mail: senkoov@gmail.com

В настоящей работе с использованием метода биолюминесцентного люциферазного определения внутриклеточной концентрации аденозинтрифосфата в клетках мицелиальных грибов, известных своей биодеструкционной активностью по отношению к образцам строительных материалов, была проведена оценка возможности применения различных производных природных гуминовых кислот в качестве антифунгальных препаратов. Грибковый биоцид АСТИЦИД® ОТП 10, содержащий 2-октил-4-изотиазолин-3-он, вводимый в затирку для заполнения межплиточных швов с целью предотвращения грибковых поражений в помещениях с высокой влажностью, применялся в работе как образец для сравнения. В качестве тест-культур использовались споры грибов *Aspergillus niger* F-1057 и *Stachybotrys chartarum* F-993, наиболее часто выявляемых среди грибных контаминаций строительных материалов. Среди этих исследованных веществ были образцы выделенного из угля (леонардита) гумата калия, модифицированного 2-метилгидрохиноном, 1,4-гидрохиноном и 2-гидрокси-1,4-гидрокси-нафтохиноном. При проведении экспериментов, направленных на изучение состояния межплиточных швов, была подтверждена антифунгальная активность гумата калия, модифицированного 2-гидрокси-1,4-гидрокси-нафтохиноном, к обоим объектам исследования. Это же соединение в концентрации 0,5–5,0 г/л проявляло заметный антифунгальный эффект при внесении в универсальный обойный клей, содержащий карбоксиметилцеллюлозу. Определение эффекта от воздействия той же добавки на споры мицелиальных грибов выявило такую антифунгальную активность, которая оказалась сопоставимой с действием коммерческого биоцида на начальном этапе исследования и превосходила его после 32 суток экспонирования грибов в контакте с изучаемой добавкой в конечной концентрации 5 г/кг строительного материала.

**Ключевые слова:** строительные материалы, антифунгальные свойства, гуминовые кислоты, грибковые культуры, люциферазная реакция.

## Antifungal protection of building materials by humic acid derivatives as assessed by ATP-metry

© 2024. O. V. Senko ORCID: 0000-0001-7831-6222, N. A. Stepanov ORCID: 0000-0003-0821-8226,

O. V. Maslova ORCID: 0000-0002-6358-1231, E. N. Efremenko ORCID: 0000-0002-6992-854X,

Lomonosov Moscow State University,

1/3, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991,

e-mail: senkoov@gmail.com

Mycelial fungi are known by their biodestructive activity towards building material samples. In this work the possibility of using various derivatives of natural humic acids as antifungal agents was evaluated using the method of bioluminescent luciferase determination of the adenosine triphosphate intracellular concentration in the mycelial fungi cells. In order to prevent fungal lesions in rooms with high humidity the fungal biocide ACTICIDE® OTP 10 containing 2-octyl-4-isothiazoline-3-one is added to the tile grout; it was used as a comparison sample in our study. *Aspergillus niger* F-1057 and *Stachybotrys chartarum* F-993 spores were used as test cultures as the most frequently detected fungal contaminants of building materials. The samples of extracted from coal (leonardite) potassium humate modified with 2-methylhydroquinone, or 1,4-hydroquinone or 2-hydroxy-1,4-hydroxynaphthoquinone were the studied substances. The antifungal activity of potassium humate modified with 2-hydroxy-1,4-hydroxynaphthoquinone to both fungal test objects was confirmed in experiments aimed at studying the condition of intertile joints. The same compound at a concentration of 0.5–5.0 g/L showed noticeable antifungal effect when applied to a universal wallpaper adhesive containing carboxymethylcellulose. Antifungal activity of the same additive was comparable with the action of commercial biocide at the initial stage of the study, and after 32 days of exposure of fungi in contact with the studied additive at a final concentration of 5 g/kg of building material was superior to its action.

**Keywords:** building materials, antifungal effect, humic acids, fungal cells, luciferase reaction.

К эксплуатационным характеристикам современных строительных и отделочных материалов предъявляются всё более высокие требования в связи с необходимостью противостоять негативному воздействию различных факторов, в том числе и биоповреждениям. При условиях, благоприятных для развития микроорганизмов (повышении температуры и влажности во внутренних помещениях производственных и жилых зданий), процессы деградации строительных материалов сопровождаются выделением продуктов метаболизма, приводящих к негативному воздействию не только на материалы, но и на здоровье человека [1, 2]. В частности, такими эффектами характеризуются клетки грибов, выделяющих микотоксины [3], попадание которых далее в организм человека через ингаляционные и трансдермальные пути приводит к возникновению микотоксикозов, аллергических реакций, бронхо-лёгочных заболеваний. Сами клетки микроорганизмов могут попадать во внутренние помещения вместе с наружным воздухом, почвой, водой, растениями, пищевыми продуктами, животными и людьми [4–6]. Наибольшее количество микроорганизмов сосредоточено, прежде всего, на поверхностях в рабочих и жилых помещениях с повышенной влажностью, а также на оборудовании и приборах, контактирующих с водой (кондиционерах, насосных системах, приборах водораспыления, посудомоечных и стиральных машинах и др.).

Среди микроорганизмов особую опасность для контаминации внутренних помещений представляют плесневые грибы. К числу наиболее часто встречающихся среди них относятся грибы родов *Aspergillus*, *Stachybotrys*, *Cladosporium*, *Penicillium* и др. [3, 7]. Повышенный уровень влажности способствует прорастанию спор грибов, в частности, и тех, которые характеризуются наличием в клетках меланиновых пигментов, имеющих тёмную окраску, что сильно ухудшает внешний вид как жилых, так и промышленных помещений. Плесневые грибы могут развиваться практически на любых материалах, включая полимерные и композитные, благодаря их способности синтезировать и секретировать различные гидролитические ферменты, и выживать в широком диапазоне температур и значений pH [8].

Существуют различные методы защиты строительных материалов от биологических повреждений, включая использование фунгицидных добавок [9, 10], которые вводятся в состав материалов в процессе их изготов-

ления. Кроме того, на поверхность готовых строительных материалов и изделий, подверженных микробному поражению, наносятся биоцидные составы, а периодичность таких обработок может регулироваться возникающими потребностями [11, 12]. Поиск дешёвых средств, малотоксичных и эффективных в своём действии против мицелиальных грибов, которые могли бы применяться для обработки строительных материалов, является одной из актуальных задач в современном строительстве.

В качестве таких средств большой интерес вызывают производные природных гуминовых кислот, получаемых в промышленных количествах из каменного угля [13]. Они известны своей способностью ингибировать ферменты различных бактерий и архей, а также возможностью снижать их метаболическую активность [14, 15]. Интересно, что химически синтезированные производные гуминовых кислот, обладающие разным редокс-потенциалом, проявляют различное ингибирующее воздействие на бактериальные клетки, в том числе, находящиеся в сложных по составу консорциумах [15]. В отношении грибковых культур подобные исследования ранее не проводились и потому имеют научную новизну и актуальность.

В настоящее время существует стандартный метод контроля обсеменённости строительных материалов (ГОСТ 9.049-91), который основан на заражении материалов суспензией микроорганизмов-деструкторов и экспонировании образцов в условиях, благоприятных для их биодеструкции, в течение длительного времени. Оценка биостойкости строительных материалов с привнесёнными в них биоцидами производится в ходе последующего микробиологического анализа методом микроскопирования, однако данный метод не даёт точной информации, так как клетки могут не формировать колоний, подтверждающих их жизнеспособность, но при этом сохранять её. Известно, что биолюминесцентные методы анализа концентрации внутриклеточного аденозинтрифосфата (АТФ) могут использоваться как для контроля отклика клеток микроорганизмов на ингибирующий эффект разных веществ на их внеклеточные ферменты, необходимые им для выживания, так и эффектов, связанных с непосредственным биоцидным воздействием веществ на сами клетки [16, 17]. В основе высокочувствительной биолюминесцентной АТФ-метрии лежит использование специфичной реакции, катализируемой люциферазой (фермент

класса 1.13.12.7, катализирующий окисление люциферина, сопровождающееся излучением видимого света) светляков (*Photinus pyralis*), которая позволяет определять низкие остаточные концентрации АТФ в живых клетках и сравнивать по этому параметру эффективность воздействия на них потенциальных биоцидов. АТФ-метрия считается сегодня одним из быстрых и достоверных методов «быстрой микробиологии», позволяющих проводить эффективный скрининг ингибиторов клеточного роста и метаболизма [18].

Целью работы была оценка на основе данных биолюминесцентной АТФ-метрии потенциала различных производных гуминовых кислот, обладающих разным редокс-потенциалом, в качестве веществ, проявляющих антифунгальные свойства.

### Объекты и методы исследования

В исследовании антифунгального потенциала производных природных гуминовых кислот были использованы образцы следующих соединений: гуamat калия (ГК), выделенный из угля (леонардита); ГК, химически модифицированный 2-метилгидрохиноном (ГКМНҚ), 1,4-гидрохиноном (ГКНҚ) и 2-гидрокси-1,4-гидроксиафтохиноном (ГКНҚ). Все соединения ранее были исследованы по содержанию химических элементов, редокс-потенциалу и распределению углерода по структурным фрагментам [13, 14]. Основные характеристики использованных в данной работе производных гуминовых кислот представлены в таблице.

Для сравнения в работе использовался грибковый биоцид АСТICIDE® ОТР 10, содержащий 2-октил-4-изотиазолин-3-он, вводимый в затирку для заполнения межплиточных швов с целью предотвращения грибковых поражений в помещениях с высокой влажностью. Также в работе использовался клей обоечный универсальный КМЦ, жизнеспособность грибных спор в котором оценивалась в присутствии и отсутствии исследуемых добавок. В качестве клеток тест-культур в работе применялись споры грибов *Aspergillus niger* F-1057 и *Stachybotrys chartarum* F-993, наиболее часто выявляемые среди грибных контаминаций разных строительных материалов.

Накопление спор грибов *A. niger* F-1057 и *S. chartarum* F-993 проводилось при их культивировании на питательных агаризованных средах (мальт-пептонном агаре и суслоагаре, соответственно), рекомендованных для них

во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (<https://vkpm.genetika.ru/katalog-mikroorganizmov>).

Суспензии спор грибов в 0,9% растворе NaCl, приготовленные методом смыва с твердых питательных сред в концентрации  $(1,0-1,2) \cdot 10^7$  спор/мл, наносились на образцы керамических плиток и межплиточные шовные поверхности таким образом, чтобы конечная концентрация спор составляла  $1 \cdot 10^6$  спор/см<sup>2</sup>. Далее полученные образцы экспонировались при температуре  $(21 \pm 1)$  °C и влажности  $(81 \pm 1)$ % в термостатируемой камере, которые регулярно контролировались и поддерживались на постоянном уровне.

Для сравнения антифунгального эффекта, оказываемого на грибы образцами гуминовых кислот и применяемым на практике грибковым биоцидом АСТICIDE® ОТР 10, содержащим 2-октил-4-изотиазолин-3-он, все вещества вносились одинаково в состав межшовной затирки в концентрации 5 г/кг. В клей универсальный КМЦ (Каменский химкомбинат, Россия), приготовленный согласно рекомендациям производителя, вносились те же суспензии спор, что и в межшовную затирку, но при этом использовалось только соединение ГКНҚ, которое добавлялось в клей в концентрации 0,5–5,0 г/л после выявления у этого вещества наиболее выраженного антифунгального действия в эксперименте на межплиточной шовой затирке.

Люциферин-люциферазный реагент для АТФ-метрии (ЗАО Биохиммак, Москва, Россия) использовался для определения концентрации внутриклеточного АТФ, согласно известному методу с применением диметилсульфоксида в качестве экстрагента [18]. Все эксперименты проводились в трёх повторностях, полученные данные статистически обрабатывались в программе SigmaPlot (версия 12.5, Systat Software Inc., США).

### Результаты и обсуждение

Предварительный анализ выбранных для исследования производных гуминовых кислот (табл. 1) свидетельствовал о том, что все эти соединения относятся к числу низкомолекулярных гуминовых веществ, содержащих такой набор химических функциональных групп, который обеспечивает им хорошую растворимость в различных средах, которые могут применяться для приготовления строительных материалов. Лучшая растворимость обеспечивает и лучшую биодоступность для клеток

Таблица / Table

Основные характеристики образцов гуминовых кислот, использованных в работе  
Main characteristics of humic acid samples used in the study

Характеристики / Characteristic	ГК / PH	ГКМНҚ PHMНҚ	ГКНҚ PHNҚ	ГКНҚ PHNҚ
Молекулярная масса, кДа Molecular weight, kDa	9,3	7,5	7,2	9,4
Элементный состав, % / Elemental composition, %				
C	62,2	71,5	55,31	64,9
H	4,6	5,2	3,7	4,3
N	1,7	1,3	2,3	1,0
O	31,4	22,0	38,7	29,8
Распределение углерода по структурным фрагментам, % от общего содержания углерода Carbon distribution by structural fragments, % of total carbon content				
CНn (алкильные цепи) CНn (alkyl chains)	14,0	17,6	11,3	10,0
C <sub>Alc-O</sub> *	9,0	11,2	12,2	6,0
C <sub>Ar</sub> **	42,8	42,0	40,4	46,8
C <sub>Ar-O</sub> ***	10,6	10,1	11,8	7,6
C <sub>COO</sub>	16,6	13,9	16,7	16,6
C <sub>C=O</sub>	7,0	5,2	7,6	13,0
Редокс-ёмкость, ммоль/г Redox capacity, mmol/g	0,2	1,0	0,9	0,1
Антиоксидантная активность***, моль/мг Antioxidant activity, mol/mg	0,5	2,0	1,7	1,0

Примечание к таблице и рисункам 1–3: ГК – гумат калия, выделенный из угля (леонардита), ГКМНҚ – гумат калия, химически модифицированный 2-метилгидрохиноном, ГКНҚ – гумат калия, химически модифицированный 1,4-гидрохиноном, ГКНҚ – гумат калия, химически модифицированный 2-гидрокси-1,4-гидроксиафтахиноном, \*C<sub>Alc-O</sub> – O-замещённый алифатический углерод, \*\*C<sub>Ar</sub> – ароматический углерод, \*\*\*C<sub>Ar-O</sub> – O-замещённый ароматический углерод, \*\*\* – при определении в качестве эквивалента использовался Тролокс.

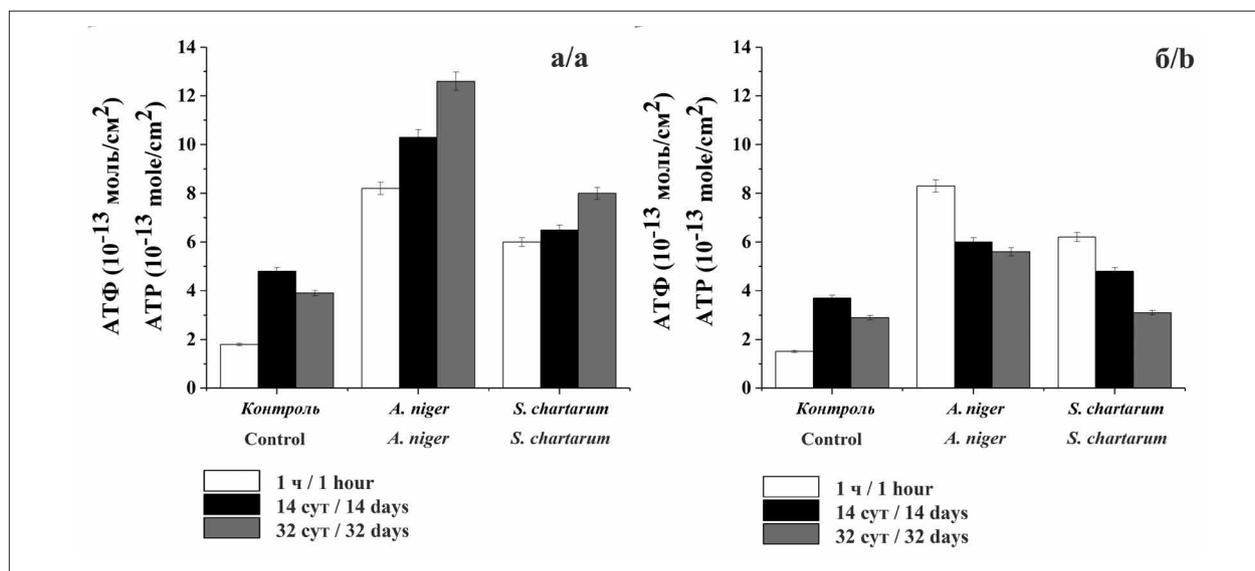
Note on table and figures 1–3: PH – potassium humate isolated from coal (leonardite), PHMНҚ – potassium humate, chemically modified with 2-methylhydroquinone, PHNҚ – potassium humate, chemically modified with 1,4-hydroxy-1,4-hydroxy-2-naphthoquinone, \*C<sub>Alc-O</sub> – substituted O-aliphatic carbon, \*\*C<sub>Ar</sub> – aromatic carbon, \*\*\*C<sub>Ar-O</sub> – substituted O-aromatic carbon, \*\*\* – Trolox was used as an equivalent in the determination.

антимикробных агентов, способных гипотетически более эффективно проявлять свою противомикробную активность. Небольшой размер молекул, выбранных для эксперимента гуминовых кислот (табл. 1), согласно литературным данным [19, 20], должен обеспечивать им проникновение в клетки микроорганизмов, способствуя проявлению антимикробных свойств. Чтобы снизить вероятность постоянного прямого контакта с человеком потенциально активные антифунгальные агенты были введены в сухом виде в межплиточную шовную затирку и в объём водного раствора обойного клея, которые могли бы сдерживать развитие грибов в подобных материалах.

Введение веществ с предполагаемой антифунгальной активностью в состав шовной затирки для облицовочных плиток было выполнено аналогично тому, как это делается

на практике с коммерческим применяемым биоцидом АСТИЦИД® ОТП. Далее было произведено нанесение спор грибов из их суспензий на подготовленные поверхности и осуществлено экспонирование полученных образцов в течение нескольких суток с параллельным отбором проб на биOLUMИнесцентное определение концентрации АТФ в клетках грибов (рис. 1). Во всех образцах с коммерческим биоцидом (рис. 1б) обсеменённость образцов, независимо от грибного штамма, была ниже в сравнении с контрольными образцами без биоцида (рис. 1а).

С течением времени эффективность действия биоцида АСТИЦИД® ОТП постепенно снижалась, что приводило к прорастанию спор, и в отношении гриба *A. niger* действие биоцида после месяца проводимых исследований оказалось в 2 раза менее эффективным



**Рис. 1.** Концентрация внутриклеточного АТФ, определённая в материалах с грибными спорами, взятыми с поверхности керамической плитки без биоцидной добавки в межплиточную затирку (а) и с биоцидной добавкой в виде 2-октил-4-изотиазолин-3-она в концентрации 5 г/кг (б)  
**Fig. 1.** The concentration of intracellular ATP determined in materials with fungal spores taken from the surface of ceramic tiles without a biocidal additive in the interplate grout (a) and with 5 g/kg of 2-octyl-4-isothiazoline-3-one biocidal additive (b)

в сравнении со второй исследуемой грибковой культурой (рис. 1б). Здесь следует отметить, что в отличие от производных гуминовых кислот коммерческий биоцид является трудно растворимым соединением, требует использования органического растворителя (аcetона) для его введения в строительные материалы, и после введения и улетучивания аcetона снижается биодоступность биоцида и его антифунгальное действие по отношению к спорам грибов.

Было установлено, что обсеменённость спорами гриба *A. niger*, которая контролировалась с помощью биолюминесцентной АТФ-метрии, была выше, чем аналогичный параметр, установленный для *S. chartarum* (рис. 1б), что говорило о том, что клетки р. *Aspergillus* в выбранных условиях проведения эксперимента оказались более жизнеспособными и устойчивыми к воздействию использованной коммерческой фунгицидной добавки. Следовательно, при её введении в состав строительных материалов следует увеличивать её концентрацию или заменить на другую.

Исследование антифунгального действия выбранных производных гуминовых кислот на споры тех же мицелиальных грибов выявило у них наличие антифунгальной активности, которая оказалась сопоставимой с действием коммерческого биоцида на начальном этапе исследования и проявила более существенное

антимикробное воздействие по результатам после 32-суточного экспонирования спор в контакте с исследуемыми добавками в концентрации 5 г/кг строительного материала. Лучшим среди исследованных соединений оказался ГКNQ (рис. 2).

Нафтохинон-содержащий образец отличался от других производных ГК тем, что он обладал свойствами наиболее активного акцептора электронов. В аэробных системах роль акцептора электронов обычно выполняет молекулярный кислород, при этом для поддержания энергетического баланса в клетках грибов необходимо функционирование существующей дыхательной цепи переноса электронов. В этой связи присутствие дополнительного акцептора электронов в среде с клетками грибов, и его возможное проникновение в клетку [19], очевидно, приводит к снижению уровня синтеза ими внутриклеточного АТФ и интенсивности их метаболической активности.

Известно, что клеткам грибов при их прорастании и существовании в вегетативном состоянии для синтеза ферментов, необходимых для биодegradации субстратов, присутствующих в микроокружении, необходим значительный расход молекул АТФ [21, 22]. А поскольку синтез АТФ в аэробных условиях в присутствии акцепторов электронов, отличных от O<sub>2</sub>, снижен, то в целом такие условия приводят к желаемому

результату в виде снижения уровня жизнеспособности клеток грибов-контаминантов. Сами гуминовые кислоты способны вступать во множественные нековалентные взаимодействия с белками, в частности, с ферментами, секретируемыми клетками грибов, образуя межмолекулярные водородные и гидрофобные связи, которые способствуют, таким образом, «иммобилизации» ферментов с частичной потерей ими своей подвижности и каталитической активности. В первую очередь, это касается, как ранее было установлено, именно гидролитических ферментов разных микроорганизмов [15, 23]. Как известно, такие гидролазы максимально важны именно для грибов, поскольку основные процессы подготовки субстратов к их потреблению и усвоению клетками грибковых культур осуществляются вне их тела под гидролитическим воздействием соответствующих секретируемых ферментов [22]. В этой связи, ГКНҚ, исследованный среди других образцов гуминовых кислот, имел разноплановое воздействие на клетки грибов-контаминантов строительных материалов: действие «ловца электронов», предназначенных для переноса в дыхательной цепи, необходимого для выработки и запасания энергии в клетках, и «ловца-нейтрализатора» ферментов, способных обеспечить клетки грибов питательными веществами. Именно биOLUMИНЕСЦЕНТНАЯ

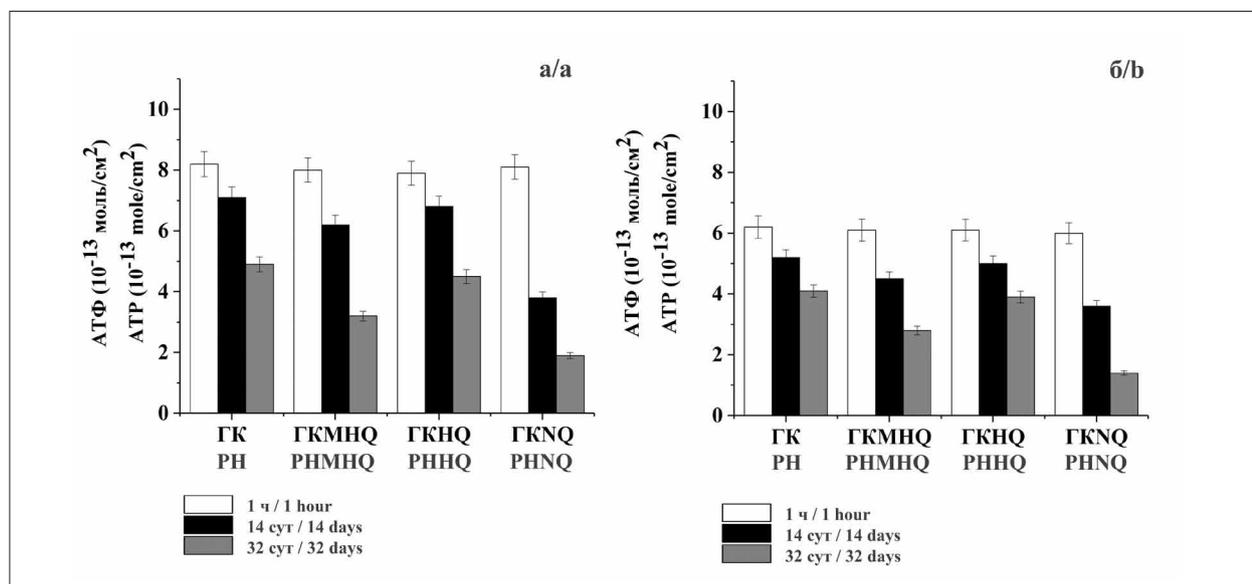
АТФ-метрия позволила подтвердить факт снижения энергетического запаса в клетках грибов.

На следующем этапе работы было исследовано антифунгальное действие только ГКНҚ в отношении тех же двух грибковых культур, но уже в среде водного раствора клея обойного КМЦ. ГКНҚ вводился в среду с обойным клеем в разных концентрациях (рис. 3).

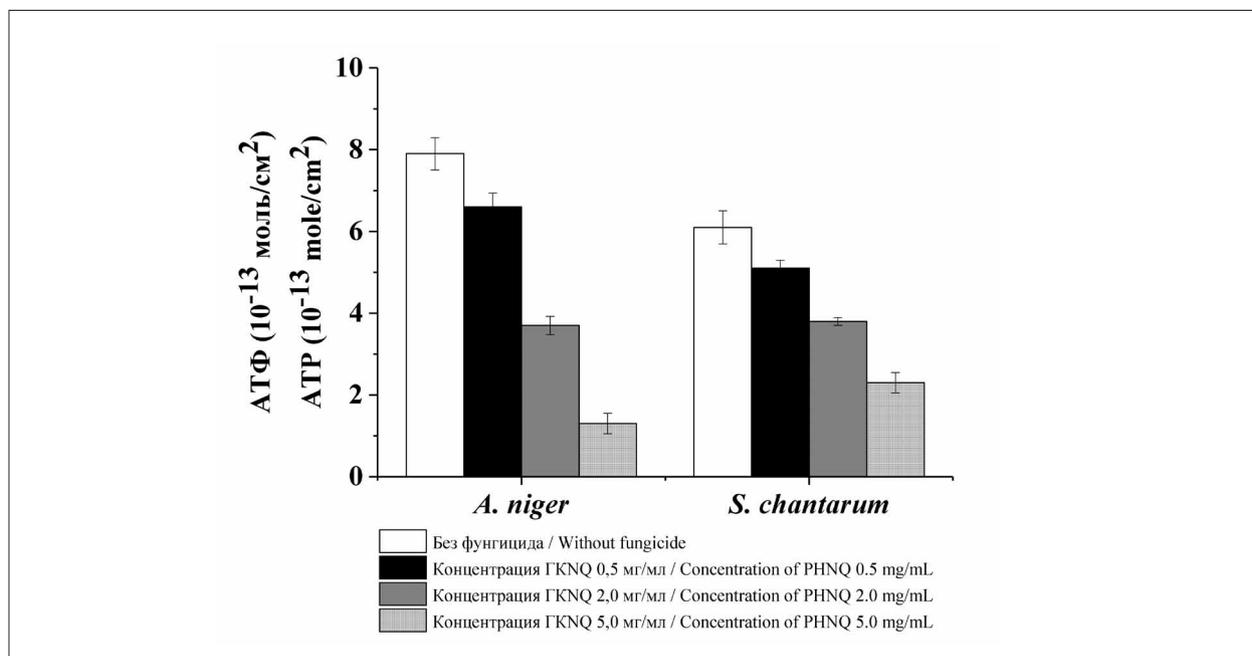
В результате проведённых исследований было установлено, что в течение 1 суток в исследуемом растворе клея обойного происходило заметное снижение обсеменённости образца строительного материала в присутствии ГКНҚ, при этом просматривалась чёткая зависимость антифунгального воздействия исследуемого вещества от его концентрации. Следует отметить, что в сравнении с концентрациями, рекомендуемыми для применения биоцидов в межшовных затирочных материалах, в случае с клеем такие концентрации для ГКНҚ явно могут быть снижены в разы.

### Заклучение

Таким образом, введение ГКНҚ в межшовную затирку для облицовочной плитки обеспечило результат, сопоставимый с применением коммерчески используемого биоцида, который может на практике гарантировать существенное снижение риска контаминации соответствующих строительных материалов



**Рис. 2.** Концентрация внутриклеточного АТФ, определённая в материалах с грибными спорами *Aspergillus niger* (а) и *Stachybotrys chartarum* (б), взятых с поверхности керамической плитки после их нанесения на образцы с добавками производных гуминовых кислот в межплиточную шовную затирку в концентрации 5 г/кг / **Fig. 2.** The concentration of intracellular ATP determined in materials with *Aspergillus niger* (a) and *Stachybotrys chartarum* (b) fungal spores taken from the surface of ceramic tiles after their application on samples with additives of 5 g/kg humic acids derivatives in the interplate suture grout



**Рис. 3.** Концентрация внутриклеточного АТФ, определённая в клее обойном универсальном КМЦ с внесёнными грибными спорами *Aspergillus niger* и *Stachybotrys chartarum* через 24 ч после их внесения в клей, содержащий ГКНҚ. В контроль добавки ГКНҚ не вносились / **Fig. 3.** Intracellular ATP concentration determined in the universal KMC wallpaper glue with *Aspergillus niger* and *Stachybotrys chartarum* spores after 24 hours of their introduction into the glue with PHNQ. No PHNQ additives were in the control

плесневыми грибами, а биолюминесцентная АТФ-метрия позволяет легко контролировать этот процесс. Исследование эффективности применения производных гуминовых кислот для подобных целей было осуществлено впервые и позволило выявить лидера (ГКНҚ), а также возможность варьирования его концентраций для антифунгальной защиты обрабатываемых материалов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-14-00092).*

### References

- Hegarty B., Dannemiller K.C., Peccia J. Gene expression of indoor fungal communities under damp building conditions: Implications for human health // *Indoor Air*. 2018. V. 28. No. 4. P. 548–558. doi: 10.1111/ina.12459
- Wang J., Janson C., Lindberg E., Holm M., Gislason T., Benediktsdóttir B., Johannessen A., Schlünssen V., Jogi R., Franklin K.A., Norbäck D. Dampness and mold at home and at work and onset of insomnia symptoms, snoring and excessive daytime sleepiness // *Environ. Int.* 2020. V. 139. Article No. 105691. doi: 10.1016/j.envint.2020.105691
- Skrobot III F., Diehl S.V., Borazjani H. Mycotoxin production by *Stachybotrys chartarum* on water-damaged building materials // *BioRes*. 2017. V. 12. No. 3. P. 6490–6503. doi: 10.15376/biores.12.3.6490-6503

- Gilbert J.A., Stephens B. Microbiology of the built environment // *Nat. Rev. Microbiol.* 2018. V. 16. No. 11. P. 661–670. doi: 10.1038/s41579-018-0065-5
- Novak Babič M., Gostinčar C., Gunde-Cimerman N. Microorganisms populating the water-related indoor biome // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2020. V. 104. No. 15. P. 6443–6462. doi: 10.1007/s00253-020-10719-4
- Rocchi S., Reboux G., Scherer E., Laboissière A., Zaros C., Rouzet A., Valot B., Khan S., Dufourg M.N., Leynaert B., Raheison C., Millon L. Indoor microbiome: Quantification of exposure and association with geographical location, meteorological factors, and land use in France // *Microorganisms*. 2020. V. 8. No. 3. Article No. 341. doi: 10.3390/microorganisms8030341
- Hegarty B., Pan A., Haverinen-Shaughnessy U., Shaughnessy R., Peccia J. A DNA sequence-based approach for classifying the mold status of buildings // *Environ. Sci. Technol.* 2020. V. 54. No. 24. P. 15968–15975. doi: 10.1021/acs.est.0c03904
- Wösten H.A.B. Filamentous fungi for the production of enzymes, chemicals and materials // *Curr. Opin. Biotechnol.* 2019. V. 59. P. 65–70. doi: 10.1016/j.copbio.2019.02.010
- Aburto-Medina A., Le P.H., MacLaughlin S., Ivanova E. Diversity of experimental designs for the fabrication of antifungal surfaces for the built environment // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2021. V. 105. No. 7. P. 2663–2674. doi: 10.1007/s00253-021-11214-0
- Ghamrawi S., Bouchara J.P., Corbin A., Rogalsky S., Tarasyuk O., Bardeau J.F. Inhibition of fungal growth by

silicones modified with cationic biocides // Mater. Today Commun. 2020. V. 22. Article No. 100716. doi: 10.1016/j.mtcomm.2019.100716

11. Dyshlyuk L., Babich O., Ivanova S., Vasilchenko N., Atuchin V., Korolov I., Russakov D., Prosekov A. Antimicrobial potential of ZnO, TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub> nanoparticles in protecting building materials from biodegradation // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2020. V. 146. Article No. 104821. doi: 10.1016/j.ibiod.2019.104821

12. Płaza G., Achal V. Biosurfactants: Eco-friendly and innovative biocides against biocorrosion // International Journal of Molecular Sciences. 2020. V. 21. No. 6. Article No. 2152. doi: 10.3390/ijms21062152

13. Volikov A.B., Mareev N.V., Konstantinov A.I., Molodykh A.A., Melnikova S.V., Bazhanova A.E., Gasanov M.E., Nikolaev E.N., Zhrebker A.Ya., Volkov D.S., Zykova M.V., Perminova I.V. Directed synthesis of humic and fulvic derivatives with enhanced antioxidant properties // Agronomy. 2021. V. 11. No. 10. Article No. 2047. doi: 3390/agronomy11102047

14. Efremenko E., Senko O., Stepanov N., Mareev N., Volikov A., Perminova I. Suppression of methane generation during methanogenesis by chemically modified humic compounds // Antioxidants. 2020. V. 9. No. 11. Article No. 1140. doi: 10.3390/antiox9111140

15. Efremenko E., Stepanov N., Senko O., Maslova O., Volikov A., Zhirkova A., Perminova I. Strategies for variable regulation of methanogenesis efficiency and velocity // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2022. V. 106. No. 19–20. P. 6833–6845. doi: 10.1007/s00253-022-12148-x

16. Stepanov N., Senko O., Perminova I., Efremenko E. A new approach to assess the effect of various humic compounds on the metabolic activity of cells participating in methanogenesis // Sustainability. 2019. V. 11. Article No. 3158. doi: 10.3390/su11113158

17. Efremenko E., Senko O., Stepanov N., Maslova O., Lomakina G.Yu., Ugarova N. Luminescent analysis of ATP: Modern objects and processes for sensing // Chemosensors. 2022. V. 10. No. 11. Article No. 493. doi: 10.3390/chemosensors10110493

18. Efremenko E.N., Ugarova N.N., Lomakina G.Y., Senko O.V., Stepanov N.A., Maslova O.V., Aslanly A.G., Lyagin I.V. Bioluminescent ATP-metry: practical aspects. Moskva: Publishing House “Scientific Library”, 2022. 376 p. (in Russian). doi: 10.36871/978-5-907497-77-1

19. Popa D.G., Lupu C., Constantinescu-Aruxandei D., Oancea F. Humic substances as microalgal biostimulants – implications for microalgal biotechnology // Mar. Drugs. 2022. V. 20. No. 5. Article No. 327. doi: 10.3390/md20050327

20. Klein O.I., Isakova E.P., Deryabina Y.I., Kuliko-va N.A., Badun G.A., Chernysheva M.G., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Humic substances enhance growth and respiration in the basidiomycetes *Trametes maxima* under carbon limited conditions // J. Chem. Ecol. 2014. V. 40. No. 6. P. 643–652. doi: 10.1007/s10886-014-0445-x

21. Niture S.K., Kumar A.R., Pant A. Role of glucose in production and repression of polygalacturonase and pectate lyase from phytopathogenic fungus *Fusarium moniliforme* NCIM 1276 // World J. Microbiol. Biotechnol. 2006. V. 22. P. 893–899. doi: 10.1007/s11274-006-9119-3

22. Li B., Lai T., Qin G., Tian S. Ambient pH stress inhibits spore germination of *Penicillium expansum* by impairing protein synthesis and folding: a proteomic-based study // J. Proteome Res. 2010. V. 9. No. 1. P. 298–307. doi: 10.1021/pr900622j

23. Lyu L., Li Y., Zhang S., Chen Z. Deeper insights into the effect of humic acid on kitchen waste anaerobic digestion: Enzyme activities, microbial community dynamics, and key metabolic pathways // Fermentation. 2023. V. 9. No. 10. Article No. 881. doi: 10.3390/fermentation9100881

## Применение спектрофотометрического метода для обнаружения антибиотика цефотаксим в модельном растворе

© 2024. А. А. Абрамова, к. т. н., доцент, А. М. Батуева, магистрант, Е. В. Грахова, ст. преподаватель, М. Ю. Дягелев, к. т. н., доцент, В. Г. Исаков, д. т. н., профессор, А. М. Непогодин, ст. преподаватель, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7, e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

Количество исследований по выявлению антибиотиков в городских сточных водах, в поверхностных водоёмах с каждым годом становится всё больше, так как возникновение устойчивости микроорганизмов к антибиотикам является одной из актуальнейших проблем здравоохранения. В данной статье представлены результаты работы по определению антибиотика цефотаксим в модельных растворах с помощью спектрофотометрического метода. В нескольких сериях опытов были установлены минимальные концентрации цефотаксима в модельных растворах, которые можно выявить с помощью спектрофотометра ПЭ-5400 УФ; установлен пик оптической плотности в ультрафиолетовом диапазоне при длине волны 300 нм; зафиксировано смещение спектра поглощения с 300 на 280 нм в пробах модельного раствора при увеличении времени хранения раствора; установлена особенность цефотаксима – увеличение пика оптической плотности в пробах при смещении pH в кислую среду, особенно при значениях pH от 0,2 до 2,0, и уменьшение пика оптической плотности с минимальными значениями при pH от 6,0 до 6,4 в диапазоне длин волн от 280 до 300 нм. Подробно рассмотрено воздействие добавляемых в модельный раствор цефотаксима ионов металлов и представлены результаты двух серий опытов, в которых за счёт изменения соотношений концентраций цефотаксима и ионов металлов определена возможность образования комплексных соединений с ионами  $Al^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ . При увеличивающейся концентрации ионов металлов происходит также рост оптической плотности в образцах с ионами  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ; в модельных растворах с ионами  $Al^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  изменения оптической плотности не наблюдалось. Полученные значения величин оптической плотности и спектров поглощения модельного раствора цефотаксима можно использовать при разработке методики обнаружения антибиотиков в разных средах, в том числе и в городских сточных водах.

**Ключевые слова:** сточные воды, антибиотики, спектроскопия, очистка стоков, микрозагрязнители, ионы металлов, комплексные соединения.

## Application of spectrophotometric method for antibiotic Cefotaxime detection in a model solution

© 2024. А. А. Abramova ORCID: 0000-0003-0868-9626,  
А. М. Batueva ORCID: 0000-0003-2553-1417, Е. В. Grachova ORCID: 0000-0002-6344-6320,  
М. Yu. Dyagelev ORCID: 0000-0002-4949-2646, В. Г. Isakov ORCID: 0000-0002-9816-7700,  
А. М. Nepogodin ORCID: 0000-0002-5491-0160,  
Kalashnikov Izhevsk state technical University,  
7, Studencheskaya, Izhevsk, Russia, 426069,  
e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

The number of studies on the detection of antibiotics in urban wastewater and in surface waterbodies is increasing every year, as the increase of antibiotic-resistance of microorganisms is one of the most urgent public health problems. This paper presents the results of study on the detection of the antibiotic Cefotaxime (CFX) in model solutions using the spectrophotometric method. In several series of experiments we determined the minimal CFX concentrations in the model solutions, which can be detected with the spectrophotometer PE-5400 UV. The optical density peak in the ultraviolet range at 300 nm is established. The shift of absorption spectrum from 300 to 280 nm in the model solution samples with increasing storage time of the solution was fixed. We determined the CFX peculiarities: increase of optical density peak in samples at pH shift to acidic medium, especially at pH values from 0.2 to 2.0 as well as reduction of the optical density peak with minimum pH values from 6.0 to 6.4 in the wavelength range from 280 to 300 nm. The effect of metal ions added to the model solution of CFX is considered in detail. The results of two series of experiments are presented,

in which the possibility of complex compounds with  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  formation was determined by changing the concentration ratios of CFX and metal ions. There was an increase in optical density in samples with  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  with increasing in metal ions content. In model solutions with  $\text{Al}^{3+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  there was no change in optical density. The obtained values of optical density and absorption spectra of CFX model solution can be used when developing methods of antibiotic detection in various media, including urban wastewater.

**Keywords:** wastewater, antibiotics, spectroscopy, wastewater treatment, micropollutants, metal ions, complex compounds.

В настоящее время присутствие фармацевтических соединений и их метаболитов, считающихся новыми органическими микрозагрязнителями, в водной среде вызывает серьёзную озабоченность во всём мире [1, 2]. Основная причина, объясняющая появление фармацевтических препаратов в водах, заключается в их широком потреблении и неполном удалении на городских очистных сооружениях, поэтому остатки препаратов попадают в поверхностные, грунтовые, морские воды и влияют в дальнейшем на их качество [3–7]. В первую очередь, присутствие большого количества фармацевтических загрязнителей в воде, особенно антибиотиков, подвергает опасности непатогенное микробное сообщество. Поскольку антибиотики являются активными химическими веществами, даже при незначительной концентрации они могут разрушить присутствующие в среде микробные сообщества, однако, если некоторые представители сообщества выживут, их генетический состав может измениться и вырабатывается устойчивость к присутствующим в среде антибиотикам [8–12]. Всемирная организация здравоохранения сообщила об устойчивости к противомикробным препаратам как о серьёзной проблеме общественного здравоохранения, которая, как ожидается, к 2050 г. будет ежегодно уносить около 10 млн жизней [8].

Согласно литературным данным, лекарственное загрязнение водной среды через бытовые сточные воды является основным и может достигать 90% от всего поступления лекарственных средств в окружающую среду [13]. Поступление лекарств в бытовые сточные воды чаще всего зависит от доли выведения лекарств из организма человека через естественные выделения (моча, пот, кал), которая варьирует в широком диапазоне (рис. 1). Данные исследований [13, 14] показывают, что тетрациклины, пенициллины, фторхинолоны и бета-блокаторы (за исключением пропранолола и бетаксолола) выводятся практически без изменений, тогда как анальгетики и противовоспалительные препараты интенсивно метаболизируются, хотя процентные уровни

экскреции для большинства метаболитов неизвестны.

Следует отметить, что при попадании в городскую систему водоотведения лекарственные препараты, в том числе антибиотики, подвергаются воздействию ряда факторов, таких как температура, pH среды, время пребывания и др., а также взаимодействию с компонентами стоков. В данном ключе интересной становится оценка вероятности взаимодействия антибиотиков с отдельными компонентами, например, с ионами металлов с образованием комплексных соединений, что может в свою очередь усложнить методику и процесс обнаружения антибиотиков.

Для ограничения объекта исследования авторами статьи был проведён обзор опубликованных материалов о типах и видах назначаемых антибиотиков и их выявлении в сточных водах. Проведённый анализ показал, что одним из часто назначаемых препаратов особенно в последние несколько лет по данным [15] является цефалоспорин, который как разновидность антибактериального средства, обладающего спектральной активностью и высокой эффективностью, сыграл важную роль у тяжёлобольных новой коронавирусной инфекцией (COVID-19). Стоит также отметить, что наиболее часто обнаруживаемый в сточных водах антибиотик цефалоспориновой группы – это цефотаксим (табл. 1). Частоту его обнаружения можно объяснить тем, что цефотаксим (CFX) относится к одной из самых важных и представительных групп среди современных антибиотиков – цефалоспоринов третьего поколения. Резистентность к этому антибиотику в клинически значимой концентрации имеет важное клиническое значение из-за растущего числа резистентных бактерий, несущих гены  $\beta$ -лактамаз расширенного спектра, которые часто связаны с множественной лекарственной устойчивостью и широко распространены в окружающей среде [15].

Однако, в работах [15–21] авторами проводится количественная оценка препаратов и не уделяется должного внимания возможности образования комплексных соединений указанных антибиотиков с присутствующими

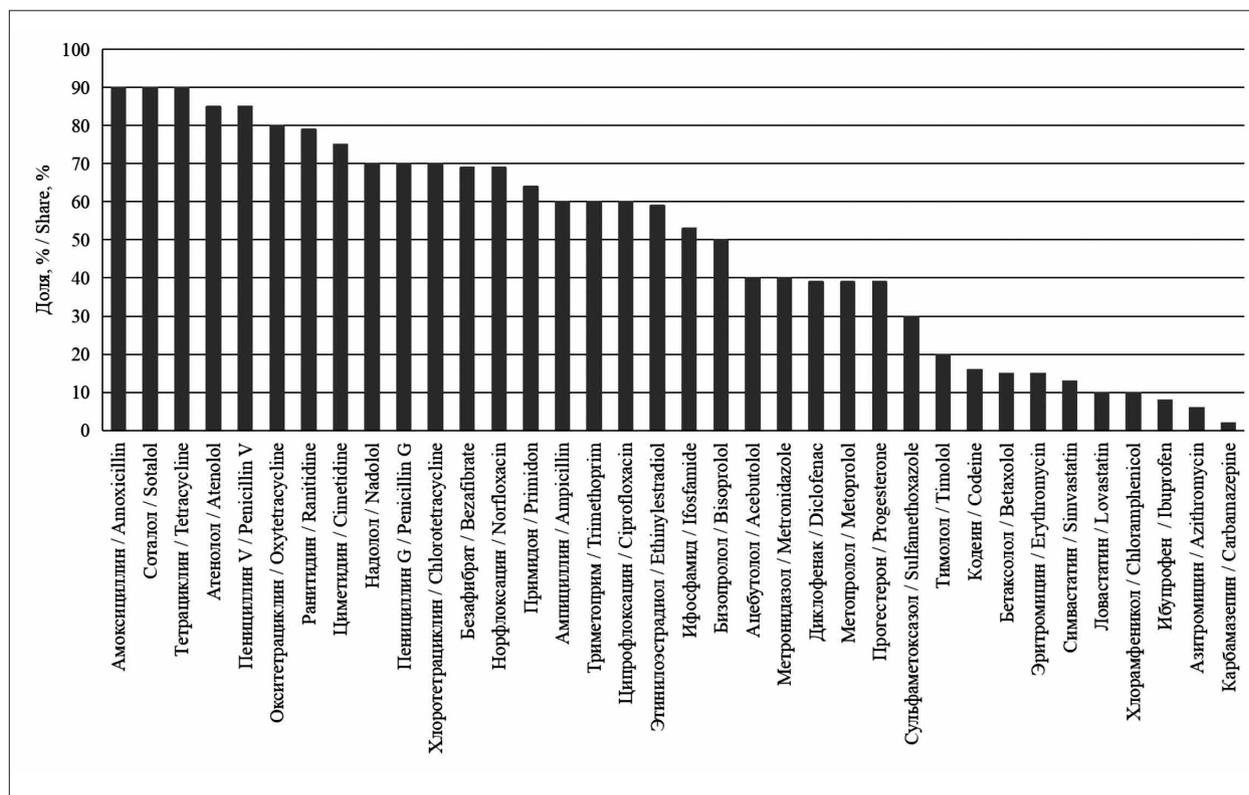


Рис. 1. Доля выведения (%) некоторых лекарственных препаратов из организма человека (по данным [14])

Fig. 1. Selected pharmaceuticals' excretion rates (%) in humans (according to [14])

Таблица 1 / Table 1

Содержание антибиотиков цефалоспориновой группы в сточных водах в разных странах  
Detected concentrations of cephalosporin group antibiotics in wastewater in different countries

Вид Type	Концентрация (нг/дм <sup>3</sup> ) Concentration (ng/dm <sup>3</sup> )		Источник стоков Effluent source	Страна Country	Источник Reference
	неочищенные стоки raw sewage	очищенные стоки treated effluent			
Цефазолин Cefazolin	94,72–146,58	14,58–24,79	городские / больничные urban / hospital	Испания Spain	[16]
Цефепим Cefepime	5180	–	больничные hospital	Бразилия Brazil	[17]
Цефепим Cefepime	8520	–	больничные hospital	Румыния Romania	[18]
Цефиксим Cefixime	–	49,85–422,1	городские urban	Иран Iran	[19]
Цефотаксим Cefotaxime	252,83–363,53	207,87–223,36	городские / больничные urban / hospital	Испания Spain	[16]
Цефотаксим Cefotaxime	143,69–240,38	43	больничные hospital	Вьетнам Vietnam	[20]
Цефотаксим Cefotaxime	–	10–119	промышленные industrial	Вьетнам Vietnam	[20]

Примечание: прочерк в таблице обозначает отсутствие данных.  
Note: A dash in the table indicates no data.

в стоках ионами металлов ( $Me^+$ ), что естественным образом будет снижать итоговое содержание препарата в стоках.

Полученные данные дадут возможность масштабировать методику для оценки загрязнённости сточных и поверхностных вод другими лекарственными препаратами, в первую очередь, на территории России, так как в отечественной литературе присутствует лишь несколько результатов – это работы [5, 22, 23], в которых приводятся данные о содержании в отдельных водоёмах России таких лекарственных препаратов как N-бутил-бензолсульфамид (0,026 мг/дм<sup>3</sup>), 12-метатетрадекановая кислота (0,038 мг/дм<sup>3</sup>), бета-ситостерол (0,005 мг/дм<sup>3</sup>), диклофенак (0,000025–0,00035 мг/дм<sup>3</sup>), ампициллин (0,000005 мг/дм<sup>3</sup>), тетрациклин (0,00662 мг/дм<sup>3</sup>). Нами не обнаружено полноценных результатов исследований, подтверждающих или опровергающих присутствие фармацевтических препаратов, в первую очередь, антибиотиков, в большинстве водоёмов регионов России, а также в сточных водах, что позволяет говорить об актуальности данного направления исследований.

Целью данной работы стало определение возможности обнаружения с помощью спектрофотометрии антибиотика цефотаксима (CFX) в модельных растворах при изменении pH, увеличении времени хранения раствора и оценка возможности образования комплексных соединений данного антибиотика с ионами металлов.

### Материалы и методы исследований

В качестве основного метода исследований был выбран спектрофотометрический метод, который по сравнению с другими методами, такими как высокоэффективная, ультравысокоэффективная жидкостная и газовая хроматография [24], более доступен для большинства лабораторий биохимического анализа на очистных сооружениях сточных вод (ОССВ).

Экспериментальные исследования проводили на спектрофотометре ПЭ-5400 УФ (пределы измерения от 190 до 1000 нм, предел допускаемой абсолютной погрешности измерения по длине волны  $\pm 2$  нм, предел допускаемой абсолютной погрешности при измерении спектральных коэффициентов направленного пропускания в диапазоне от 315 до 1000 нм  $\Delta T = \pm 0,5\%$  согласно Паспорта прибора [26]), с помощью которого была проведена оценка:

- возможности обнаружения минимальных концентраций CFX в модельных растворах;
- поведения CFX в модельном растворе в зависимости от времени его хранения;
- влияния pH среды на определение CFX в модельных растворах;
- влияния  $Me^+$  на образование комплексных соединений с CFX.

Для каждой серии опытов готовился модельный раствор из дистиллированной воды и CFX с концентрацией последнего 2,094 мкг/дм<sup>3</sup>, что в несколько раз больше обнаруженных значений в сточных водах (табл. 1), однако, при проведении опытов с минимальной концентрацией антибиотика в модельном растворе возростала приборная ошибка. Минимальная концентрация CFX в модельных растворах, которую получалось выявить с помощью спектрофотометра ПЭ-5400 УФ, составила 250 нг/дм<sup>3</sup>.

Для достижения задач исследований был проведён расчёт времени достижения стоков от потребителей до ОССВ в г. Ижевске. По полученным данным расчётное время движения стоков составило от нескольких часов до нескольких суток. Для оценки возможности изменения (окисления) CFX в течение расчётного времени движения стоков по сетям водоотведения модельный раствор с антибиотиком хранился в закрытой ёмкости при 18 °С (среднегодовая температура стоков в г. Ижевске) в течение 2 суток, после чего были проведены повторные измерения на спектрофотометре.

Для оценки изменения оптической плотности CFX при разных значениях кислотности (pH от 0,2 до 11,9), в ёмкости с раствором CFX добавляли растворы NaOH (0,1 н и 0,001 н) и H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,05 н и 0,005 н). Значение pH измеряли с помощью портативного pH-метра.

Возможность образования комплексных соединений CFX с  $Me^+$  оценивалась с помощью добавления готовых стандартных растворов ионов металлов в модельный раствор. Для исследований использовались стандартные растворы ионов Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, которые встречаются в составе городских сточных вод [25]. Концентрация ионов в стандартных растворах составляла 2 мкг/дм<sup>3</sup>, при этом были проведены опыты с разным соотношением концентрации CFX и  $Me^+$ . В одной серии опытов концентрация CFX была выше, и итоговое соотношение составило CFX: $Me^+$  – 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, в другой серии опытов наоборот, в модельный раствор добавляли готовые стандартные растворы  $Me^+$  при постоянном значении концентрации CFX до достижения указанных соотношений.

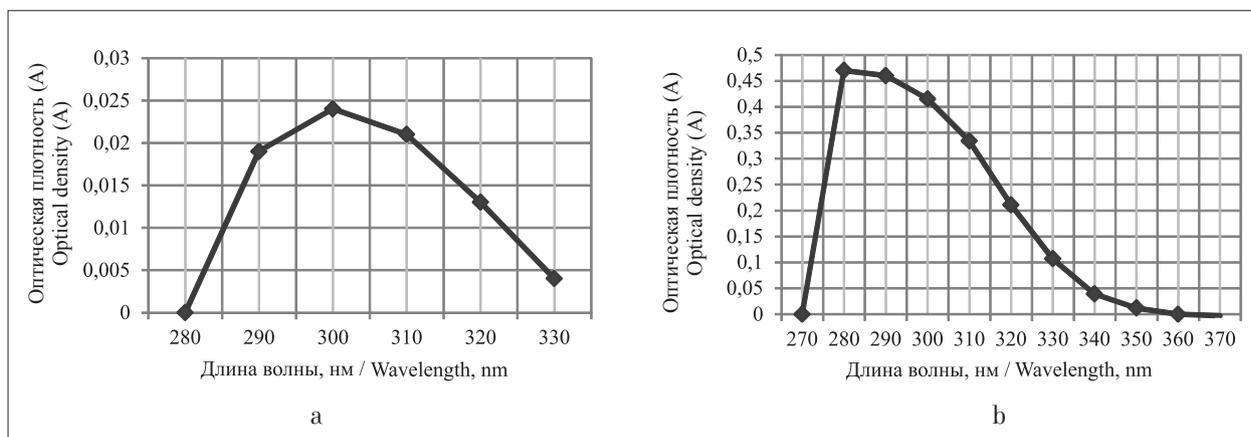


Рис. 2. Зависимость оптической плотности от изменения длины волны (нм):

а – в свежеприготовленном модельном растворе антибиотика,

б – в модельном растворе антибиотика через 48 ч

Fig. 2. Optical density's dependence on wavelength (nm):

a – in a freshly prepared model antibiotic solution, b – in a model antibiotic solution after 48 hours

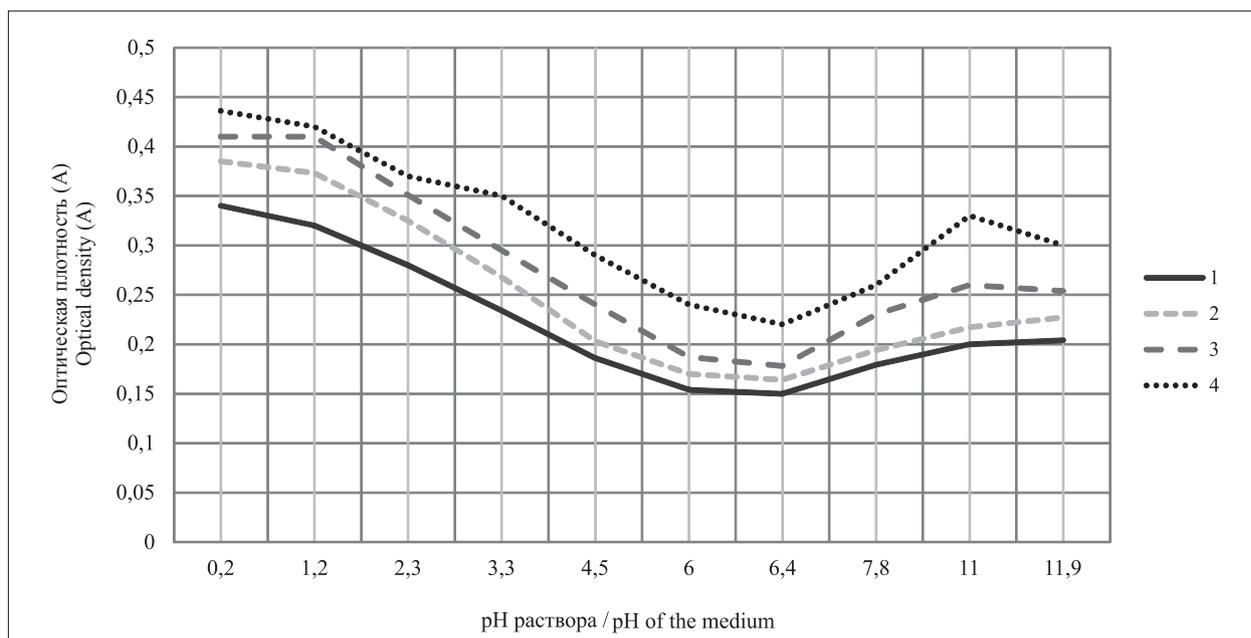


Рис. 3. Зависимость оптической плотности от pH среды: 1) λ 300 нм; 2) λ 290 нм;

3) λ 285 нм; 4) λ 280 нм / Fig. 3. Optical density's dependence on pH of the medium:

1) λ 300 nm; 2) λ 290 nm; 3) λ 285 nm; 4) λ 280 nm

### Результаты и обсуждение

После установки пределов обнаружения CFX в модельных растворах для работы со спектрофотометром ПЭ-5400 УФ, была установлена длина волны, которой соответствовало максимальное значение оптической плотности (A) для опытного образца модельного раствора с концентрацией CFX 2,094 мкг/дм<sup>3</sup> – 300 нм (см. рис. 2а). Пунктиром показан доверительный интервал измерения оптической плотности, рассчитанный по формуле [26]:

$$\Delta A = 0,43 \cdot \Delta T \cdot 10^{A-2}$$

Измерение максимальной оптической плотности было проведено повторно после выдерживания модельного раствора антибиотика в закрытой ёмкости при 18 °С. Измерения показали, что хранение модельного раствора антибиотика более двух суток приводит к смещению основного максимума поглощения с 300 до 280 нм (рис. 2b), выходящее за пределы доверительного интервала измерения длины волны и оптической плотности раствора. Данное смещение спектра может быть вызвано образованием нескольких форм антибиотика в растворе, что привело к незначительным изменениям спектральных характеристик его водного раствора.

Для определения влияния рН среды на обнаружение цефотаксима в модельных растворах была проведена серия опытов по определению оптической плотности поглощения при разных значениях рН среды (рис. 3). Длина волны спектрофотометра была установлена в диапазоне от 280 до 300 нм, так как предыдущие результаты измерений показали, что для исследуемого антибиотика максимум поглощения находится в указанном диапазоне.

Анализ полученных зависимостей показывает, что оптическая плотность антибиотика в модельном растворе при рН от 6,0 до 6,4 стремится к минимальному значению, предположительно из-за особенностей его химического строения, характерного для данного амфотерного типа антибиотиков.

В водном растворе цефотаксим в зависимости от рН среды диссоциирует с образованием либо катиона, либо биполярного иона, либо аниона. В результате измерений было установлено, что перераспределение ионных форм антибиотика CFX в исследуемом водном растворе проявляется в спектральных характеристиках при изменении величины рН. Положение основного максимума поглощения ( $\lambda = 280$  нм) фиксировалось в кислой среде в диапазоне значений рН раствора от 0,2 до 2,0. Увеличение рН до 6,0 приводило к появлению в растворе катионов антибиотика, что отражалось в уменьшении интенсивности оптической плотности А.

Увеличение рН до 11,9 приводило к незначительному увеличению оптической плотности А. В области значений рН от 4,0 до 8,0 спад максимума поглощения, предположительно, был обусловлен присутствием в растворе преимущественно молекулярной формы CFX. Появление в растворе катионов CFX при изменении рН от 0,2 до 2,0 и анионов при рН больше 10,0 отмечалось на спектре увеличением его интенсивности оптической плотности А.

Исследование вероятности взаимодействия CFX в модельном растворе с  $Me^+$  и возможности образования с ними комплексных соединений проходило в две серии: в первой серии опытов измерение спектров проводили в пробах с постоянной концентрацией CFX и увеличивающимся содержанием  $Me^+$ , во второй серии повышалась концентрация CFX. Таким образом, была попытка установить взаимосвязь между соотношением CFX и  $Me^+$ , и вероятностью образования комплексных соединений. Все опыты проводились на спектрофотометре ПЭ-5400 УФ с установленной длиной волны 290 нм.

Анализ полученных данных первой серии показывает, что при увеличивающейся концентрации  $Me^+$  происходит также рост оптической плотности в образцах, где использовались ионы  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ , однако в модельных растворах с ионами  $Al^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  изменения оптической плотности не наблюдалось (рис. 4). Поэтому были проведены дополнительные

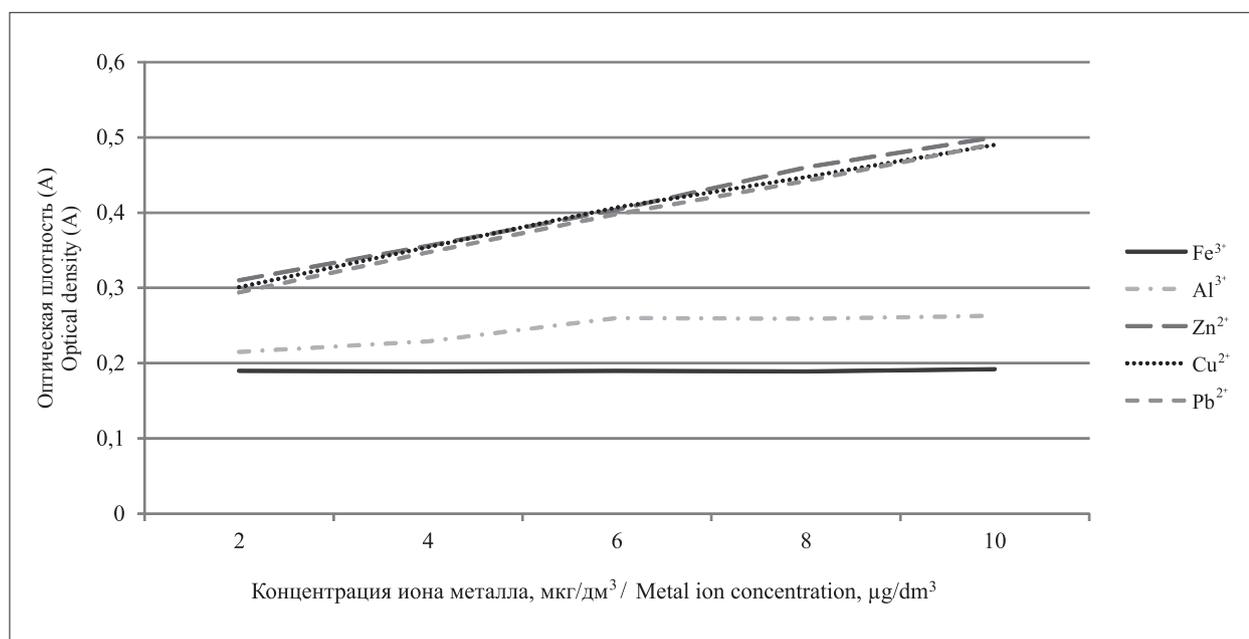
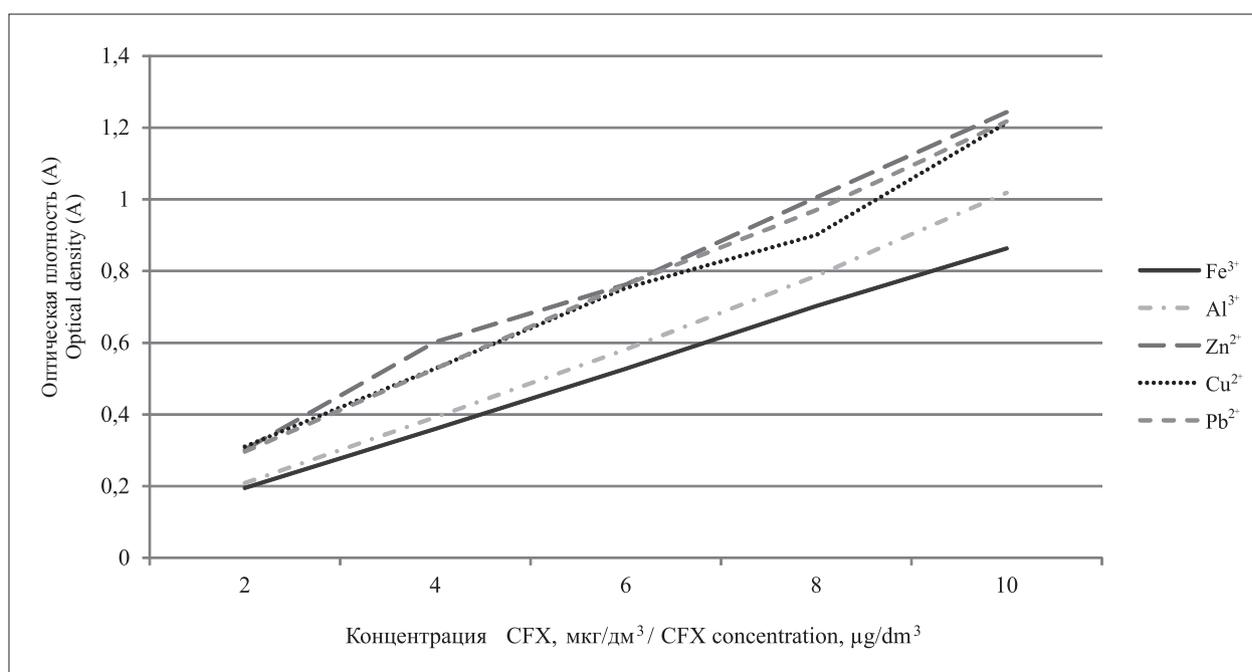


Рис. 4. Зависимость оптической плотности от изменения концентрации  $Me^+$  (мкг/дм³) в модельном растворе с CFX / Fig. 4. Optical density's dependence on metal ion concentration ( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) in the model solution with CFX



**Рис. 5.** Зависимость оптической плотности от присутствующего  $Me^+$  в модельном растворе с CFX при длине волны 300 нм / **Fig. 5.** Optical density's dependence on metal ion presence in the model solution with CFX at 300 nm



**Рис. 6.** Зависимость оптической плотности от изменения концентрации CFX в модельном растворе с  $Me^+$  / **Fig. 6.** Optical density's dependence on CFX concentration in the model solution with metal ion

измерения в диапазоне длин волн от 280 до 320 нм и при соотношении антибиотик :  $Me^+$  1:2.

Анализ полученных кривых показывает, что в модельном растворе CFX может вступить в реакцию с  $Al^{3+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  с образованием соединения, которое можно определить по пику оптической плотности при длине волны 300 нм (рис. 5).

Полученные данные второй серии показывают, что при увеличении концентрации

CFX в модельном растворе происходит закономерное увеличение оптической плотности (рис. 6). Соответственно, на данном этапе сложно судить о возможности комплексобразования, так как прибор реагирует только на рост концентрации антибиотика в пробах.

Полученные данные позволяют отметить, что CFX может вступить во взаимодействие с отдельными  $Me^+$ , что необходимо учитывать

при оценке присутствия CFХ в разных средах, включая и городские сточные воды.

### Заключение

Спектрофотометрический метод отлично зарекомендовал себя в качестве метода исследования содержания антибиотиков в среде. Экспериментальные исследования проводились на спектрофотометре ПЭ-5400 УФ. В качестве антибиотика-маркера использовался CFХ. Применение этого антибиотика в качестве маркера объясняется широким распространением при лечении заболеваний, доступностью и широким спектром действия. Практические измерения спектров поглощения показали, что пик оптической плотности (А) для модельных растворов CFХ приближен к ультрафиолетовому диапазону, поэтому авторы рекомендуют для выполнения аналогичных опытов использовать оптические приборы, работающие в диапазоне света от 50 до 700 нм.

При работе с растворами CFХ установлено, что при хранении водного раствора CFХ в течение нескольких суток происходит смещение пика поглощения с 300 до 280 нм. Таким образом, при проведении измерений в реальных условиях можно оценить время пребывания CFХ в исследуемой среде или для обнаружения CFХ, например, в пробах сточных вод на ОССВ оценку начинать при длине волны 280 нм.

Измерения интенсивности поглощения в модельных растворах антибиотика CFХ при изменении реакции среды на кислую (диапазон рН от 0,2 до 2,0) приводит к смещению пика оптической плотности на 280 нм, а при увеличении рН наблюдается спад максимума поглощения. Таким образом, для идентификации CFХ в многокомпонентной среде достаточно изменить рН на кислую, что должно привести к появлению пиков поглощения, которые будут стремиться к минимуму при рН от 6,0 до 6,4 в диапазоне длин волн от 280 до 300 нм.

Результаты опытов по определению взаимодействия CFХ с  $Me^+$  показывают, что изменение величин оптической плотности и длин волн поглощения растворов CFХ с  $Me^+$  можно использовать при разработке методики обнаружения антибиотиков в разных средах, в том числе и в городских сточных водах.

### References

1. Gubanov L.N., Katrayeva I.V., Gusarov M.L., Kolpakov M.V. Development of integrated wastewater aftertreat-

ment process for pharmaceutical plant // Volga Scientific Journal. 2009. No. 4 (12). P. 148–152 (in Russian).

2. Abramova A.A., Batueva A.M., Vasiliev A.V., Diagelev M.Y., Naumkina E.J., Chursin I.O. Assessment of urban wastewater pollution by antibiotic drugs of the cephalosporin group and the possibility of their determination by spectrophotometric method // PNRPU Bulletin. Applied Ecology. Urban Development. 2021. No. 2 (42). P. 53–65 (in Russian). doi: 10.15593/2409-5125/2021.02.05

3. Sokolova L.I., Gal'chenko D.S., Smirnova M.G., Blinovskaya Ya.Yu. Using of natural aluminosilicates for clean wastewater from antibiotics various classes // Gidrometeorologiya i Ekologiya. 2021. No. 62. P. 113–126 (in Russian). doi: 10.33933/2074-2762-2021-62-113-126

4. Sazykin I.S., Azhogina T.N., Khmelevtsova L.E., Khammami M.I., Sazykina M.A. Role of wastewater treatment plants in distribution of antibiotic resistance genes // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 223–230 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-223-230

5. Barenboim G.M., Chiganova M.A. Pharmaceutical pollution of surface and waste water // Water: Chemistry and Ecology. 2012. No. 10 (52). P. 40–46 (in Russian).

6. Nieto-Juárez J.I., Torres-Palma R.A., Botero-Coy A.M., Hernández F. Pharmaceuticals and environmental risk assessment in municipal wastewater treatment plants and rivers from Peru // Environ. Int. 2021. V. 155. Article No. 106674. doi: 10.1016/j.envint.2021.106674

7. Mezrin N.M., Abramova A.A., Diagelev M.Yu., Isakov V.G. Estimation of the specific pollutants in municipal wastewater // Water Supply and Sanitary Technique. 2022. No. 7. P. 34–41 (in Russian). doi: 10.35776/VST.2022.07.05

8. Abramova A.A., Isakov V.G., Dyagelev M.Yu., Nepogodin A.M., Grakhova E.V. Specific pollutants in urban wastewater and their impact on the environment // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. No. 981 (3). Article No. 032083. doi: 10.1088/1755-1315/981/3/032083

9. Jansen K.U., Anderson A.S. The role of vaccines in fighting antimicrobial resistance (AMR) // Hum. Vaccin. Immunother. 2018. V. 14. No. 9. P. 2142–2149. doi: 10.1080/21645515.2018.1476814

10. Moo C.L., Yang S.K., Yusoff K., Ajat M., Thomas W., Abushelaibi A., Lim S.H., Lai K.S. Mechanisms of antimicrobial resistance (AMR) and alternative approaches to overcome AMR // Curr. Drug Discov. Technol. 2020. V. 17. No. 4. P. 430–447. doi: 10.2174/1570163816666190304122219

11. Azad H., Mohsennia M., Cheng C., Amini A. Cross-linked poly(vinyl butyral) amine-functionalized polyacrylonitrile adsorptive membrane nano-composited with CeO<sub>2</sub> nanoparticles for simultaneous aqueous removal of heavy metals and cefotaxime // Chemical Engineering Journal. 2022. V. 435. No. 1. Article No. 134849. doi: 10.1016/j.cej.2022.134849

12. Sazykin I.S., Seliverstova E.Yu., Khmelevtsova L.E., Azhogina T.N., Kudeevskaya E.M., Khammami M.I., Gnennaya N.V., Al-Rammahi A.A.K., Rakin A.V., Sazykina M.A. Occurrence of antibiotic resistance genes

in sewages of Rostov-on-Don and lower Don River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 4. P. 76–82. doi: 10.25750/1995-4301-2019-4-076-082

13. Kozlova M.A. Research of pharmaceutical pollution of waterbodies in wastewater discharge areas of cities and industrial enterprises // *Water: Chemistry and Ecology*. 2019. No. 3-6. P. 30–36 (in Russian).

14. Monteiro S.C., Boxall A.B.A. Occurrence and fate of human pharmaceuticals in the environment // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* / Ed. D.M. Whitacre. V. 202. Springer, New York, NY, 2010. P. 53–154. doi: 10.1007/978-1-4419-1157-5\_2

15. Marano R.B.M., Fernandes T., Manaia C.M., Nunes O., Morrison D., Berendonk T.U., Kreuzinger N., Tenson T., Corino G., Fatta-Kassinos D., Merlin C., Topp E., Jurkevitch E., Henn L., Scott A., Heß S., Slipko K., Laht M., Kisand V., Di Cesare A., Karaolia P., Michael S.G., Petre A.L., Rosal R., Pruden A., Riquelme V., Agüera A., Esteban B., Luczkiewicz A., Kalinowska A., Leonard A., Gaze W.H., Adegoke A.A., Stenstrom T.A., Pollice A., Salerno C., Schwermer C.U., Krzeminski P., Guilloteau H., Donner E., Drigo B., Libralato G., Guida M., Bürgmann H., Beck K., Garelick H., Tacão M., Henriques I., Martínez-Alcalá I., Guillén-Navarro J.M., Popowska M., Piotrowska M., Quintela-Baluja M., Bunce J.T., Polo-López M.I., Nahim-Granados S., Pons M.N., Milakovic M., Udikovic-Kolic N., Ory J., Ousmane T., Caballero P., Oliver A., Rodriguez-Mozaz S., Balcazar J.L., Jäger T., Schwartz T., Yang Y., Zou S., Lee Y., Yoon Y., Herzog B., Mayrhofer H., Prakash O., Nimonkar Y., Heath E., Baraniak A., Abreu-Silva J., Choudhury M., Munoz L.P., Krizanovic S., Brunetti G., Maile-Moskowitz A., Brown C., Cytryn E. A global multinational survey of cefotaxime-resistant coliforms in urban wastewater treatment plants // *Environ. Int.* 2020. V. 144. Article No. 106035. doi: 10.1016/j.envint.2020.106035

16. Rodriguez-Mozaz S., Chamorro S., Marti E., Huerta B., Gros M., Sánchez-Melsió A., Borrego C.M., Barceló D., Balcazar J.L. Occurrence of antibiotics and antibiotic resistance genes in hospital and urban wastewaters and their impact on the receiving river // *Water Res.* 2015. V. 69. P. 234–242. doi: 10.1016/j.watres.2014.11.021

17. Szekeres E., Baricz A., Chiriac C.M., Farkas A., Opris O., Soran M.-L., Andrei A.-S., Rudi K., Balcazar J.L., Dragos N., Coman C. Abundance of antibiotics, antibiotic resistance genes and bacterial community composition in wastewater effluents from different Romanian hospitals //

*Environ. Pollut.* 2017. V. 225. P. 304–315. doi: 10.1016/j.envpol.2017.01.054

18. Wielens Becker R., Ibáñez M., Cuervo Lumbaqué E., Wilde M.L., Flores da Rosa T., Hernández F., Sirtori C. Investigation of pharmaceuticals and their metabolites in Brazilian hospital wastewater by LC-QTOF MS screening combined with a preliminary exposure and in silico risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 699. Article No. 134218. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134218

19. Mirzaei R., Yunesian M., Nasser S., Gholami M., Jalilzadeh E., Shoeibi S., Mesdaghinia A. Occurrence and fate of most prescribed antibiotics in different water environments of Tehran, Iran // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 619–620. P. 446–459. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.07.27

20. Thai P.K., Ky L.X., Binh V.N., Nhung P.H., Nhan P.T., Hieu N.Q., Dang N.T.T., Tam N.K.B., Anh N.T.K. Occurrence of antibiotic residues and antibiotic-resistant bacteria in effluents of pharmaceutical manufacturers and other sources around Hanoi, Vietnam // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 645. P. 393–400. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.126

21. Azhogina T.N., Skugoreva S.G., Al-Rammahi A.A.K., Gnennaya N.V., Sazykina M.A., Sazykin I.S. Influence of pollutants on the spread of antibiotic resistance genes in the environment // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 6–14 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-006-014

22. Dolina L.F., Savina O.P. Water cleaning from residues of medicinal preparations // *Nauka ta progres transportu*. 2018. No. 3 (75). P. 36–51 (in Russian). doi: 10.15802/stp2018/134675

23. Barenboym G.M., Chiganova M.A., Berezovskaya I.V. Particular qualities of surface water bodies pollution with components of pharmaceutical substances // *Water Sector of Russia*. 2014. No. 3. P. 131–141 (in Russian). doi: 10.35567/1999-4508-2014-3-11

24. Kish L.K., Tretyakov A.V., Lavrukhina O.I., Amelin V.G., Gergel M.A., Mishchenko N.V. Transformation products of pesticides and veterinary drugs in food and raw materials (analytical review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 2. P. 15–25 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-015-025

25. Harkina O.V. Efficient operation and calculation of biological wastewater treatment facilities. Volgograd: Panorama, 2015. 433 p. (in Russian).

## О возможности использования эмпирической функции распределения для количественной оценки вероятности превышения нормативов по цветности

© 2024. А. В. Ялалетдинова, к. т. н., доцент, М. А. Малкова, к. х. н., доцент, Л. В. Еникеева, к. ф-м. н., доцент, Е. А. Кантор, д. х. н., профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450062, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1, e-mail: hawk22.89@mail.ru

Установлено, что характер распределения значений цветности воды в рамках года зависит от сезонности, поэтому для учёта этого фактора дальнейший анализ распределения показателя произведён для каждого месяца. В качестве примера приведён анализ распределений цветности для января, мая, июля и октября. Для каждого месяца выстроены вариационные ряды и рассчитаны эмпирические функции распределения цветности воды. Выявлено, что законы распределения цветности не соответствуют нормальному и логнормальному распределениям, но достаточно точно аппроксимируются полиномами (теоретической функцией распределения). Для полученных полиномов выявлены области определения значений аргумента  $x$ , при которых они обладают всеми свойствами функций распределения (непрерывно возрастают на отрезке  $[0; 1]$ ). Гипотезы о законах распределения цветности, проверенные с помощью критерия согласия Колмогорова, подтвердились. Используемая методология и полученные функции распределения цветности воды дали возможность рассчитать вероятности превышения показателем заданных значений, например, превышения норматива (20 град) для всех месяцев. Так, в январе вероятность того, что превышения норматива не произойдет, составляет 0,792, в июле 0,562, в октябре 0,809, тогда как в мае, вероятность того, что норматив по цветности не будет превышен, составляет 0,091. Знание закона распределения цветности воды, учитывающего сезонные особенности изучаемого процесса, позволяет оценить риски превышения показателем нормативных значений и использовать для принятия решений по обеспечению нормативного качества воды по показателю цветности.

**Ключевые слова:** качество воды, цветность воды, эмпирическая функция распределения, теоретическая функция распределения, критерий согласия Колмогорова, вероятность события.

## On the possibility of using the empirical distribution function to quantify the probability of exceeding the water color standards

© 2024. A. V. Yalaletdinova ORCID: 0000-0003-0883-1856, M. A. Malkova ORCID: 0000-0002-3570-4062, L. V. Enikeeva ORCID: 0000-0003-4219-4870, E. A. Kantor ORCID: 0000-0002-9629-3324, Ufa State Petroleum Technological University, 1, Kosmonavtov St., Ufa, Russia, 450062, e-mail: hawk22.89@mail.ru

We found that the nature of the distribution of water color values within a year depends on seasonality. Therefore, to take into account the above, further analysis of the distribution of the indicator was carried out for each month. The analysis of water color distributions for January, May, July and October is given as an example. Variation series were plotted and empirical water color distribution functions were calculated for each month. It is revealed that the laws of water color distribution do not correspond to normal and log-normal distributions, but are approximated quite accurately by polynomials (theoretical distribution function). For the obtained polynomials, the domains of definition of the values of the argument  $x$ , at which they have all the properties of the distribution function (continuously increase on the interval  $[0; 1]$ ) are revealed. The hypotheses about the laws of water color distribution tested using Kolmogorov–Smirnov test were confirmed. The methodology used and the resulting water color distribution functions made it possible to calculate the probabilities of an indicator exceeding the specified values, for example, exceeding the standard (20 degrees) for all months. Thus, in January, the probability of not exceeding the standard will be 0.792, in July – 0.562, in October – 0.809, while in May the probability of not exceeding the water color standard is 0.091. Knowledge of the law of water color distribution, taking into account the seasonal characteristics of the studied process, allows to assess the risks of exceeding normative values by the indicator and to use it for making decisions on ensuring normative water quality in terms of color.

**Keywords:** water quality, water color, empirical distribution function, theoretical distribution function, Kolmogorov–Smirnov test, event probability.

Природная вода как сложная многофазная система, содержит множество разнообразных минеральных и органических примесей, которые образуются в результате влияния ряда факторов, а также зависят от типа водозабора и расположения источника воды [1–3]. Водозаборах крупных городских агломераций, в которых сосредоточены предприятия нефтехимической, нефтеперерабатывающей, машиностроительной и строительной промышленности, свойственно влияние не только природных, но и техногенных факторов [4, 4–7]. Поступление загрязнителей различной природы дополняет природные показатели воды техногенными компонентами [8–12]. Например, входящее в состав цветности окрашенное органическое вещество трансформируется и соединяется с органическим веществом техногенного происхождения: бенз(а)пиреном, тяжёлыми металлами (медь, цинк, свинец), фенолами, аминами [13–19]. Помимо антропогенного воздействия предприятий для поверхностных водозаборов, в отличие от инфильтрационных, свойственны сильные годовые климатические колебания основных технологических показателей водоподготовки [2, 3, 20–23], в том числе и цветности [24, 25]. Эффективность работы очистных сооружений водоподготовки в периоды ухудшения качества воды заключается в контроле изменения показателей [24], которые зачастую колеблются в широком диапазоне значений. Поэтому нахождение вероятностей возникновения событий, для которых характерен высокий или низкий уровень загрязнения воды, позволит регулировать процесс водоочистки.

Целью работы является построение математической модели, описывающей сезонный характер распределения цветности воды, фиксируемой в створе поверхностного водозабора, и нахождение вероятности наступления ситуаций, при которых показатель превысит или не превысит заданные значения.

### Объекты и методы исследований

Объектом исследования являются ежедневные данные по цветности воды в створе поверхностного водозабора (ПВ), расположенного на реке Уфа. Пробы воды из р. Уфы отбирались ежедневно в период с 1994 по 2021 гг. согласно ГОСТ Р 59024-2020 и ГОСТ 17.1.5.05-85 на предприятии ГУП РБ «Уфаводоканал».

Река Уфа является основным источником водоснабжения для г. Уфы [26]. Большая её

часть располагается на территории Республики Башкортостан, поэтому на химический состав воды в реке влияют не только предприятия химического и нефтехимического профиля, но и геологические особенности территории [27]. Впадающие в р. Уфу притоки (свыше 280) [27] незначительно влияют на её химический состав [26]. Качество воды в реке определяется водами Павловского водохранилища (около 80%) [2], и качеством подземных вод, разгружающихся в реку [26]. Эксплуатируемые в долине реки водоносные горизонты формируются в том числе за счёт поступления в них поверхностного стока [28].

Статистическая обработка данных заключалась в построении полигона относительных частот цветности, произведённого на основе исходных данных, определении эмпирической и теоретической функций распределений цветности, и проверке гипотез об их соответствии.

Для построения полигона относительных частот область значений цветности делилась на интервалы длиной  $k$ , рассчитывались границы каждого интервала ( $x_{\min i}$ ,  $x_{\max i}$ ), находились частоты ( $n_i$ ) и относительные частоты ( $w_i = n_i/n$ ) попадания значений цветности в  $i$ -ый интервал.

Ранее нами производилось вычисление вероятности появления экстремально больших значений цветности путём аппроксимации полигона относительных частот  $w_i$  в хвосте распределения степенной функцией вида  $\rho(x) = A \cdot x^{-1-\alpha}$  [2]. Однако этот метод не даёт возможности оценить вероятность того, что цветность примет как малые, так и большие значения, либо попадёт в некоторый интервал.

Поэтому предлагается произвести аппроксимацию эмпирической функции распределения цветности, полученную на основе ряда значений накопленной относительной частоты  $F_n(x)$ , которая вычисляется кумулятивным способом и принимает значения от 0 до 1 для всех интервалов. Таким образом, значения  $F_n(x)$  можно интерпретировать как эмпирическую вероятность того, что значение случайной величины  $X$  не превысит значение аргумента  $x$ :  $F(x) = P(X < x)$ .

Аппроксимация эмпирической функции распределения  $F_n(x)$  какой-либо функцией позволила вычислить теоретическую функцию распределения  $\hat{F}(x)$ .

Проверка гипотез о соответствии эмпирического распределения цветности воды нормальному и логнормальному законам распределения вероятностей [29] производилась по критерию  $\chi^2$  Пирсона [30], а о соответствии

эмпирического и теоретического распределений – по критерию согласия Колмогорова [30]. Для этого находилась мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением  $D = \max |F_n(x) - \hat{F}(x)|$ . Затем вычислялась величина  $\lambda = D\sqrt{n}$ , где  $n$  – объём выборки. По выбранному уровню значимости  $\alpha$  (0,05) выбиралось табличное значение  $\lambda_\alpha(1,36)$ . В случаях, когда  $\lambda \leq \lambda_\alpha$ , считается, что гипотеза не противоречит опытным данным.

Функция распределения случайной величины должна быть непрерывной и монотонно возрастающей на отрезке  $[0; 1]$  [30], поэтому предполагается, что функция  $\hat{F}(x)$  удовлетворяет этим требованиям при значениях аргумента  $x \in [x_1; x_2]$ . Однако стоит учитывать, что аппроксимация  $\hat{F}(x)$  основана на выборке, множество значений которой ограничивается отрезком  $[x_{min}; x_{max}]$ , то есть минимальным и максимальным значениями в выборке, а значит, выполняет все свойства функции распределения на этом отрезке.

Поэтому область определения теоретической функции распределения стоит принимать из условия:

$$x \in [x_1; x_2] \subset [x_{min}; x_{max}] \quad (1)$$

### Результаты и обсуждение

Для цветности воды объём выборки  $n$  за период с 01.01.1994 г. по 31.12.2021 г. (ежедневные наблюдения) составляет 10227 значений. В апреле–мае, с увеличением расходов воды в реке, происходит рост значений цветности

воды, объясняющийся размывом потоками воды донных наносов. Однако, увеличение цветности воды происходит под влиянием и других факторов, например, смыва гумусовых и дубильных веществ с ландшафта или поступления в реку органического вещества аллохтонного происхождения [31–33]. В этой связи цветность можно рассматривать как случайную величину (рис. 1).

Исходя из исходной выборки  $n$  произведено построение полигона относительных частот и проанализировано распределение цветности за весь период наблюдений (рис. 2).

Большая часть наблюдений попадает в первый интервал (до 27 град), оставшиеся – формируют длинный хвост распределения, по которому производят оценку вероятности появления экстремальных значений цветности. Однако, полученное распределение цветности не учитывает сезонных особенностей изменения показателя. Например, во время паводков цветность достигает больших значений, тогда как в другие периоды колеблется в пределах некоторого интервала, в результате чего превышение норматива СанПиН 1.2.3685-21, равного 20 град, в феврале или августе – события практически невозможные и их вероятность стремится к нулю. Для учёта фактора сезонности нами исследованы закономерности распределения цветности для каждого месяца, в качестве примера приведены характеристики выборок января, мая, июля и октября (табл. 1).

Для каждой из выборок определены границы интервалов, вычислены относительные частоты  $w_i$  (рис. 3) и значения эмпирической функции распределения  $F_n(x)$  (табл. 2).

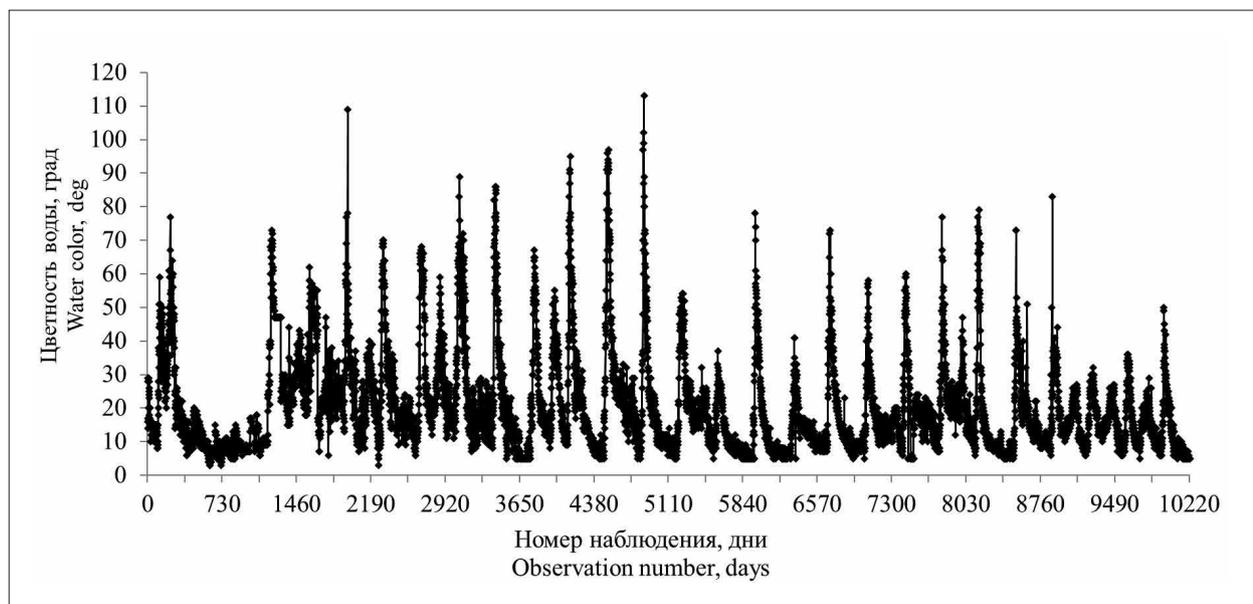


Рис. 1. Ежедневные значения цветности воды в 1994–2021 гг.  
Fig. 1. Daily water color values from 1994–2021

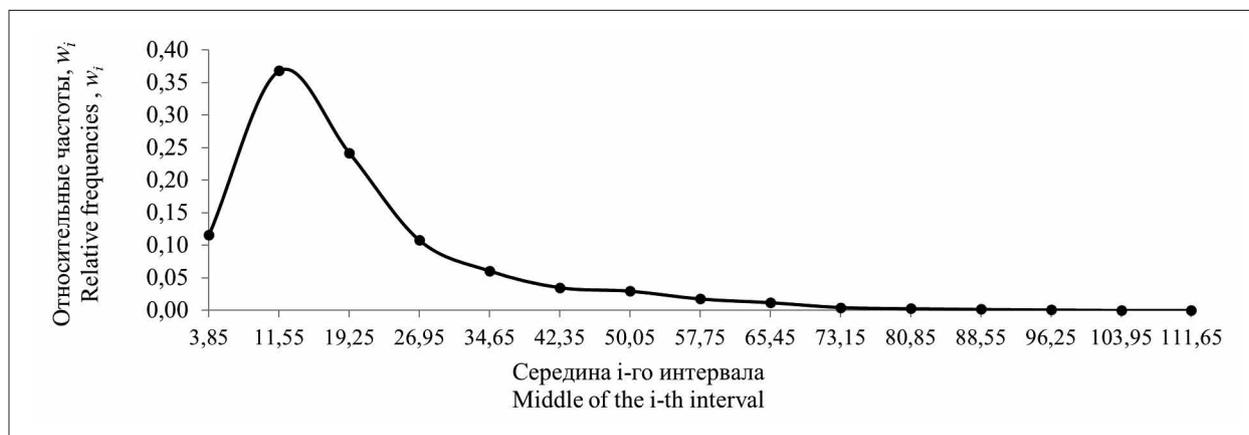


Рис. 2. Полигон относительных частот цветности воды за весь период наблюдений  
 Fig. 2. Polygon of relative frequencies of water color for the entire period

Таблица 1 / Table 1

Характеристики выборок цветности воды для января, мая, июля и октября  
 Water color characteristics for January, May, July and October

Месяц Month	Объём выборки $n_i$ Sample size $n_i$	Значение показателя (град) Indicator values (deg)		Ширина интервала $\Delta S$ Interval width $\Delta S$
		$x_{min}$	$x_{max}$	
Январь / January	866	5,0	40,0	8,0
Май / May	866	5,0	97,0	5,0
Июль / July	866	5,0	56,0	10,0
Октябрь / October	868	5,0	47,0	8,0

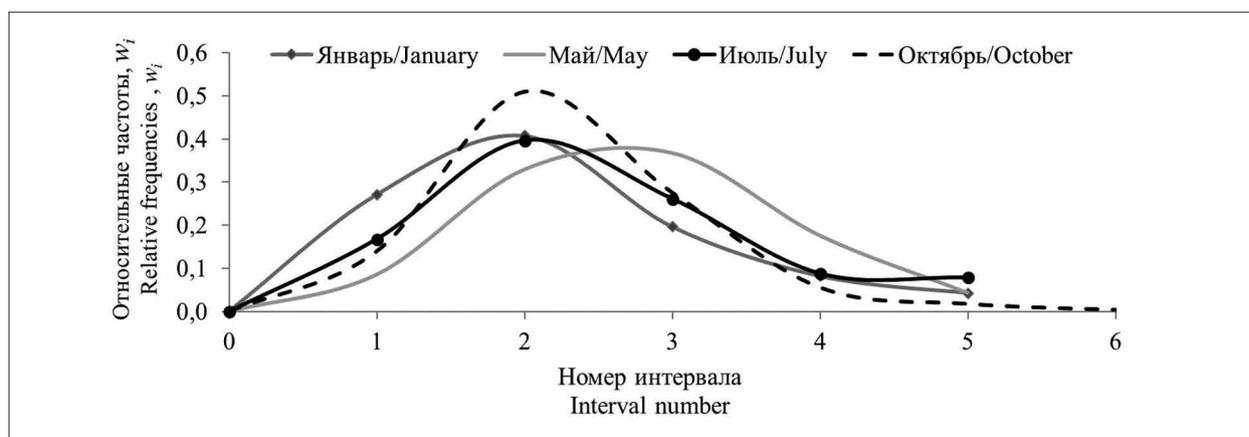


Рис. 3. Полигон относительных частот цветности воды  
 Fig. 3. Polygon of water color relative frequencies

По критерию  $\chi^2$  Пирсона проверена и отклонена гипотеза о соответствии эмпирических распределений нормальному закону [30]. Затем произведена аппроксимация значений эмпирических функций распределения  $F_n(x)$  полиномами, как наиболее простыми (табл. 3, рис. 4).

Область допустимых значений аргумента  $x$  функций определяется согласно (1) (табл. 4).

За довольно большой период времени с 1994 по 2021 гг. в каждом из исследуемых

периодов значения показателя ни разу не превысили  $x_{max}$  и не снижались ниже  $x_{min}$ . Поэтому можно считать вероятность того, что цветность не превысит  $x_{max}$ , равной 1, а вероятность появления значений ниже  $x_{min}$  равной 0 (табл. 5).

Гипотезы, подтверждающие соответствие теоретических распределений цветности воды эмпирическим, проверены по критерию согласия Колмогорова (табл. 6).

Вычисления показали, что качество аппроксимации эмпирических распреде-

Таблица 2 / Table 2

Характеристики эмпирического и теоретического распределений цветности воды  
Characteristics of the empirical and theoretical distributions of water color

Месяц Month	№	$s_1$	$s^*$	$s_2$	$n_i$	$w_i$	$F_n(s_2)$	$\hat{F}(s_2)$
Январь January	1	0,0	4,0	8,0	235	0,271	0,271	0,269
	2	8,0	12,0	16,0	353	0,408	0,679	0,674
	3	16,0	20,0	24,0	170	0,196	0,875	0,871
	4	24,0	28,0	32,0	71	0,082	0,957	0,965
	5	32,0	36,0	40,0	37	0,043	1,000	1,042
Май May	1	0,0	9,75	19,5	74	0,085	0,085	0,083
	2	19,5	29,25	39,0	285	0,329	0,415	0,435
	3	39,0	48,75	58,5	318	0,367	0,782	0,762
	4	58,5	68,25	78,0	152	0,176	0,957	0,974
	5	78,0	87,75	97,5	37	0,043	1,000	0,982
Июль July	1	0,0	5,0	10,0	145	0,167	0,167	0,164
	2	10,0	15,0	20,0	343	0,396	0,564	0,562
	3	20,0	25,0	30,0	226	0,261	0,824	0,796
	4	30,0	35,0	40,0	76	0,088	0,912	0,914
	5	40,0	45,0	50,0	68	0,079	0,991	0,964
	6	50,0	55,0	60,0	8	0,009	1,000	0,994
Октябрь October	1	0,0	4,0	8,0	121	0,139	0,139	0,137
	2	8,0	12,0	16,0	442	0,509	0,649	0,655
	3	16,0	20,0	24,0	239	0,275	0,924	0,909
	4	24,0	28,0	32,0	48	0,055	0,979	0,992
	5	32,0	36,0	40,0	15	0,017	0,997	0,995
	6	40,0	44,0	48,0	3	0,003	1,000	1,012

Примечание: № – номер интервала,  $s_1$  – нижняя граница интервала,  $s^*$  – середина интервала,  $s_2$  – верхняя граница интервала,  $n_i$  – частоты,  $w_i$  – относительные частоты,  $F_n(s_2)$  – накопленная относительная частота,  $\hat{F}(s_2)$  – значения функции распределения.

Note: № – interval number,  $s_1$  – lower limit of the interval,  $s^*$  – middle of the interval,  $s_2$  – upper limit of the interval,  $n_i$  – frequencies,  $w_i$  – relative frequencies,  $F_n(s_2)$  – accumulated relative frequency,  $\hat{F}(s_2)$  – distribution function values.

Таблица 3 / Table 3

Коэффициенты полиномов цветности воды и соответствующие им значения коэффициента детерминации / The coefficients of water color polynomials and their corresponding values of the coefficient of determination

Месяц Month	Коэффициенты полиномов / Polynomial coefficients $F_n(x) = a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$					Коэффициент детерминации $R^2$ Coefficient of determination $R^2$
	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	$a_0$	
Январь / January	$2 \cdot 10^{-7}$	0,00005	-0,0037	0,1185	-0,4665	1,0000
Май / May	0	$-2 \cdot 10^{-6}$	0,0002	0,0117	-0,2067	0,9980
Июль / July	0	$8 \cdot 10^{-6}$	-0,0013	0,0732	-0,4457	0,9986
Октябрь / October	0	$3 \cdot 10^{-5}$	-0,0035	0,1353	-0,7366	0,9993

лений хорошее: во всех случаях значения коэффициентов детерминации  $R^2$  выше 0,99 (табл. 3).

Вычислены функции распределения цветности воды для всех остальных месяцев и произведена оценка вероятности наступления событий, являющихся значимыми при принятии решений по оптимизации работы водозаборных сооружений (табл. 7).

Поскольку исторический максимум цветности воды в р. Уфе для января, февраля, марта, июля–декабря меньше 60 град, то появление больших значений принимается как практически невозможное событие.

Поскольку область определения теоретической функции ограничивается условием (1), аргумент  $x$  функции в июне будет ограничен отрезком:

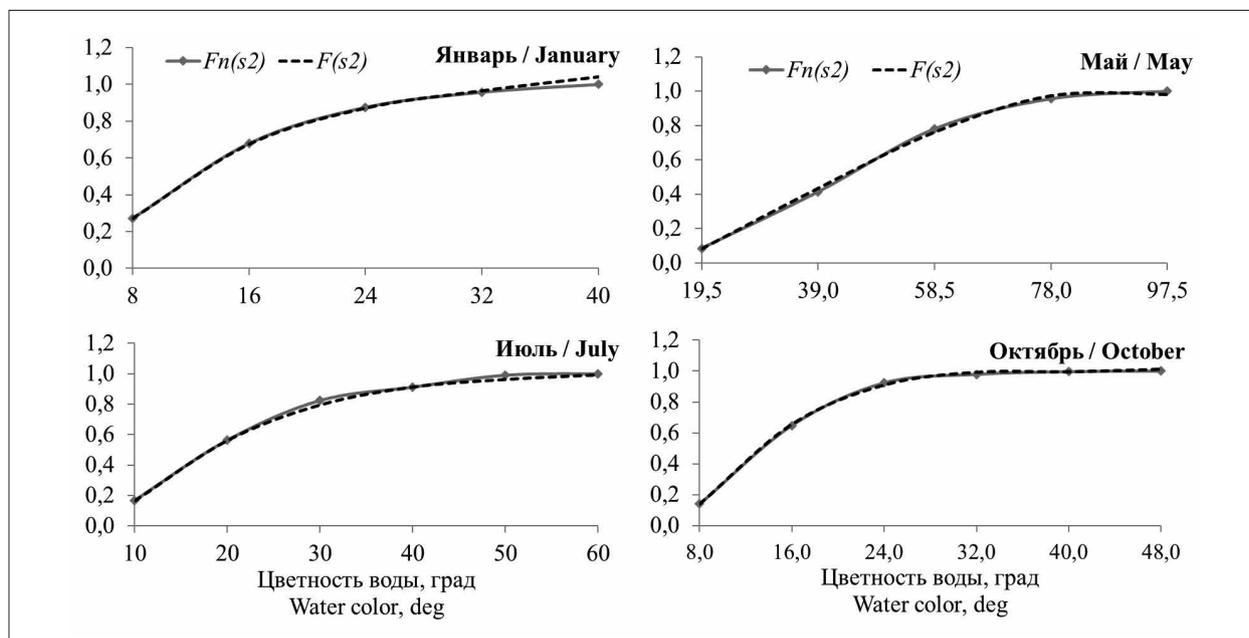


Рис. 4. Графики эмпирической  $F_n(x)$  и теоретической  $\hat{F}(x)$  функций распределения цветности воды  
 Fig. 4. Graphs of empirical  $F_n(x)$  and theoretical  $\hat{F}(x)$  water color distribution functions

Таблица 4 / Table 4

Область допустимых значений аргумента  $x$  функций  
 The area of acceptable values of the argument  $x$  of the functions

Месяц / Month	Значения аргумента / Values of the argument
Январь / January	$x \in [4,542;35,867] \subset [5,0;40,0] = [5,0;35,867]$
Май / May	$x \in [14,565;83,384] \subset [5,0;97,0] = [14,565;83,384]$
Июль / July	$x \in [6,898;61,478] \subset [5,0;56,0] = [6,898;56,0]$
Октябрь / October	$x \in [6,466;45,621] \subset [5,0;47,0] = [6,466;45,621]$

$$x \in [10,241;66,045] \subset [5,0;72,0] = [10,241;66,045] \quad (2)$$

Так как исторический минимум цветности воды для мая и июня составляет 5 град, а полиномы ограничены минимальными значениями 14,565 град (табл. 4) и 10,241 град (2) соответственно, то появление меньших значений принимается как невозможное событие (табл. 7).

Полученные функции распределения цветности по каждому месяцу помогают определить вероятности того, что значения показателя не превысят любой заданной величины, а также учитывают сезонные особенности формирования цветности воды в каждом из них.

### Закключение

Сезонные колебания цветности воды в рамках одного года приводят к необходимо-

сти исследовать распределение показателя не за весь период, а для каждого месяца отдельно. Для этого предлагается аппроксимировать ряд накопленных относительных частот (эмпирическая функция распределения) некоторой непрерывной функцией (теоретическая функция распределения), обладающей всеми свойствами функции распределения.

Установлено, что рассматриваемые распределения цветности воды для января, мая, июля и октября достаточно точно описываются полиномами ( $R^2 > 0,99$ ). Область допустимых значений аргумента  $x$  каждого из полиномов ограничивается отрезками, чтобы функция распределения случайной величины обладала свойствами функции распределения. По полученным теоретическим функциям распределения цветности определены вероятности превышения заданной величины. Например, вероятность того, что норматив по цветности не будет превышен в мае, равна 0,091, а в январе 0,792.

Таблица 5 / Table 5

Функции распределений цветности воды в реке для каждого месяца  
Distribution functions of river water color for each month

Месяц / Month	Правило / Principle
Январь / January	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 5,0 \\ -2 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 + 0,00005 \cdot x^3 - 0,0037 \cdot x^2 + 0,1185 \cdot x - 0,4665; 5,0 \leq x \leq 35,867 \\ 1; x > 35,867 \end{cases}$
Май / May	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 14,565 \\ -2 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 + 0,0002 \cdot x^2 + 0,0117 \cdot x - 0,2067; 14,565 \leq x \leq 83,384 \\ 1; x > 83,384 \end{cases}$
Июль / July	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 6,898 \\ 8 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 0,0013 \cdot x^2 + 0,0732 \cdot x - 0,4457; 6,898 \leq x \leq 56,0 \\ 1; x > 56,0 \end{cases}$
Октябрь / October	$\hat{F}(x) = \begin{cases} 0; x < 6,466 \\ 0,00003 \cdot x^3 - 0,0035 \cdot x^2 + 0,1353 \cdot x - 0,7366; 6,466 \leq x \leq 45,621 \\ 1; x > 45,621 \end{cases}$

Таблица 6 / Table 6

Проверка гипотезы о соответствии эмпирического и теоретического распределений цветности воды в реке по критерию Колмогорова / Verification of the hypothesis about the correspondence between the empirical and theoretical distributions of river water color according to the Kolmogorov–Smirnov test

Месяц / Month	D	λ	Вывод / Conclusion
Январь / January	0,042	1,22	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , the hypothesis is accepted
Май / May	0,021	0,61	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , the hypothesis is accepted
Июль / July	0,028	0,83	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , гипотеза, принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , the hypothesis is accepted
Октябрь / October	0,015	0,43	Так как $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , гипотеза принимается Since $\lambda \leq \lambda_{\alpha}^*$ , the hypothesis is accepted

Примечание: D – мера расхождения между теоретическим и эмпирическим распределением, λ – критерий отклонения эмпирического распределения от теоретического,  $\lambda_{0,05}^* = 1,36$ .

Note: D – measure of discrepancy between the theoretical and empirical distributions, λ – criterion for the deviation of the empirical distribution from the theoretical one,  $\lambda_{0,05}^* = 1.36$ .

Методология позволила установить закономерности распределения цветности и достаточно точно оценить вероятности наступления любых событий (например, превышения показателем своего норматива). Найденные уравнения могут стать основой для повышения оперативности управления процессами очистки воды на водозаборе.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, публикационный номер FEUR-2023-0006, проект «Разработка и создание малотоннажных продуктов и реагентов (ингибиторы коррозии и солеотложения, антиоксиданты, биоциды, присадки и др.) для процессов нефтегазохимии и очистки водных

Таблица 7 / Table 7

Оценка вероятности превышения нормативов по цветности воды в реке  
 Estimation of the probability of exceeding the standards for water color in the river

Месяц Month	Вероятность того, что цветность не превысит половины норматива Probability that the color will not exceed half the standard	Вероятность того, что норматив не будет превышен Probability that the standard will not be exceeded	Вероятность превышения норматива не более, чем в 2 раза Probability of exceeding the standard by no more than 2 times	Вероятность превышения норматива в 3 и более раз Probability of exceeding the standard by 3 or more times
	Интервал значений цветности воды, град / Interval of water color values, deg			
	≤ 10	≤ 20	≥20, ≤ 40	≥60
Январь January	0,397	0,792	0,250	0
Февраль February	0,461	0,894	0,106	0
Март March	0,582	0,945	0,056	0
Апрель April	0,213	0,490	0,338	0,042
Май May	0	0,091	0,362	0,217
Июнь June	0	0,308	0,470	0,008
Июль July	0,164	0,562	0,352	0
Август August	0,246	0,724	0,276	0
Сентябрь September	0,240	0,800	0,200	0
Октябрь October	0,296	0,809	0,191	0
Ноябрь November	0,300	0,742	0,259	0
Декабрь December	0,362	0,700	0,281	0

Примечание: норматив цветности воды составляет 20 град согласно СанПиН 1.2.3685-21.  
 Note: the water color standard is 20 degrees according to the SanRaN 1.2.3685-21.

сред от загрязнений, замещающих импортные вещества и материалы. Теоретические и экспериментальные подходы».

References

1. Vozhdaeva M.Yu., Kholova A.R., Vagner E.V., Kantor E.A., Kantor L.I., Trukhanova N.V., Melnitsky I.A. The use of results of expanded monitoring research for the integrated assessment of drinking water according to indices of chemical harmlessness // *Gigiena i Sanitariya*. 2018. V. 97. No. 2. P. 117–124 (in Russian). doi: 10.18821/0016-9900-2018-97-2-117-124

2. Yalaletdinova A.V., Enikeeva L.V., Vozhdaeva M.Yu., Kantor E.A. Statistical characteristics of the relationship between turbidity and water flow rate caused by releases of the water reservoir // *Theoretical and*

*Applied Ecology*. 2018. No. 1. P. 33–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-1-033-042

3. Dolgonosov B.M., Korchagin K.A. Statistical assessment of relationships between water flow in a river and water turbidity in water intakes // *Water Resour*. 2005. V. 32. P. 175–182. doi: 10.1007/s11268-005-0022-3

4. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Developing a system of environmental indicators reflecting the water management aspects of an enterprise in the light of sustainable development // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 1. P. 140–147 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-1-140-147

5. Yu B., Wang Y., Zhou Q. Human health risk assessment based on toxicity characteristic leaching procedure and simple bioaccessibility extraction test of toxic metals in urban street dust of Tianjin, China // *PLoS ONE*. 2014. V. 9. No. 3. Article No. e92459. doi: 10.1371/journal.pone.0092459

6. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2010. V. 8. No. 3. P. 199–216. doi: 10.1007/s10311-010-0297-8
7. Poletaeva V.I., Pastukhov M.V. Technogenic impact of wastewater on the hydrochemical composition of the Angara River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 90–95 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-090-095
8. Meyer T., Lei Y.D., Wania F. Transport of polycyclic aromatic hydrocarbons and pesticides during snowmelt within an urban watershed // *Water Res.* 2011. V. 45. No. 3. P. 1147–1156. doi: 10.1016/j.watres.2010.11.004
9. Vieira R., Fernandes J.N., Barbosa A.E. Evaluation of the impacts of road runoff in a Mediterranean reservoir in Portugal // *Environ. Monit. Assess.* 2013. V. 185. No. 9. P. 7659–7673. doi: 10.1007/s10661-013-3126-2
10. Eirikh A.N., Serykh T.G., Ovcharenko E.A., Podchufarova D.P., Kotovschikov A.V. Chemical composition of the surface water in the Ob River // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 96–102 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-096-102
11. Dzhamalov R.G., Nikanorov A.M., Reshetnyak O.S., Safronova T.I. The water of the Oka river basin: Chemical composition and sources of pollution // *Water and Ecology: Problems and Solutions*. 2017. No. 3. P. 114–132 (in Russian). doi: 10.23968/2305-3488.2017.21.3.114-132
12. Adamovich T.A., Skugoreva S.G., Tovstik E.V., Ashikhmina T.Ya. Study of the chemical composition of water bodies protected area for use as a regional background // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 1. P. 89–96 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-1-089-096
13. Slipchenko A.V., Kul'skij L.A., Mackevich E.S. The current state of methods for the oxidation of water impurities and the prospects for chlorination // *Himiya i tekhnologiya vody*. 1990. V. 12. No. 4. P. 326–346 (in Russian).
14. Bigaliev A.B., Sintyurina A.V., Biyasheva Z.M. On the issue of the pathogenic effect of benzopyrene as an environmental pollutant (review) // *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya*. 2009. No. 1 (24). P. 14–21 (in Russian).
15. Karpukhin M.M., Ladonin D.V. Effect of soil components on the absorption of heavy metals under technogenic contamination // *Eurasian Soil Sc.* 2008. V. 41. P. 1228–1237. doi: 10.1134/S1064229308110124
16. Kusova I.V., Krasnogorskaya N.N. Physical and chemical processes in the technosphere. Ufa: UGATU, 2008. 234 p. (in Russian).
17. Markusheva T.V., Zhurenko E.Yu., Kusova I.V. Bacteria-degrading phenol and its chlorinated derivatives. Ufa: Gilem, 2002. 108 p. (in Russian).
18. Barsova N., Yakimenko O., Tolpeshta I., Motuzova G. Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian Federation – a review // *Environ. Pollut.* 2019. V. 249. P. 200–207. doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.020
19. Soromotin A.V., Kudryavtsev A.A., Efimova A.A., Gerter O.V., Fefilov N.N. The background content of heavy metals in the water of small rivers of the Nadym-Pur interfluve area // *Geoecologiya. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2019. No. 2. P. 48–55 (in Russian). doi: 10.31857/S0869-78092019248-55
20. Dryupina E.Yu., Eyrikh A.N., Eyrikh S.S., Papi-na T.S. Substantiation of methods of calculation of allowable discharge limits in setting up a water disposal system in big cities (as exemplified by the city of Barnaul) // *Ecology and Industry of Russia*. 2016. V. 20. No. 2. P. 48–54 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2016-2-48-54
21. Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Vodneva E.N., Rasskazov S.V., Khodzher T.V., Grachev M.A. Current state of the Selenga River waters in the Russian territory concerning major components and trace elements // *Chemistry for Sustainable Development*. 2012. No. 20. P. 613–631 (in Russian).
22. Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Promakhova E.V. Catchment based analysis of matter flows in the Selenga–Baikal system // *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 5, Geografiya*. 2016. No. 3. P. 67–81 (in Russian).
23. Kuklin A.P., Tsybekmitova G.Ts. Content of toxic elements in water and macroalgae of the Argun River (Russia) basin water courses // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 30–35 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-030-035
24. Harabrin A.V., Harabrin S.V., Kantor L.I., Kantor E.A., Klyavlin M.S. On the change in turbidity, color, permanganate oxidizability and pH of the water of the Ufa River // *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2003. V. 10. No. 3. P. 80–81 (in Russian).
25. Kharabrin A.V., Kharabrin S.V., Kantor L.I., Kantor E.A., Klyavlin M.S. Comparison of water quality indicators of the Ufa River in terms of turbidity, color, oxidizability and pH in the sections of urban water intakes // *Bashkirskij himicheskij zhurnal*. 2003. V. 10. No. 3. P. 82–83 (in Russian).
26. Turikeshev G.T.-G. Brief sketch on physical geography of Ufa vicinities. Ufa: BGPU, 2000. 160 p. (in Russian).
27. Ismagilova R.S., Kuramshina N.G. Geoecological assessment of surface water pollution in the Republic of Bashkortostan // *Mezhdunarodnyy zhurnal gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2021. No. 5-2. P. 19–23 (in Russian). doi: 10.24412/2500-1000-2021-5-2-19-23
28. Abdrakhmanov R.F. Hydrogeochemistry of urban areas of the Southern Urals // *Geokhimiya*. 2019. V. 64. No. 7. P. 733–741 (in Russian). doi: 10.31857/S0016-7525647733-741
29. Ajvazyan S.A., Mhitaryan V.S. Applied statistics and fundamentals of econometrics. Moskva: YuNITI, 1998. 1022 p. (in Russian).

30. Kremer N.Sh. Theory of probability and mathematical statistics. Moskva: YuNITI –DANA, 2009. 551 p. (in Russian).

31. Dolgonosov B.M. Vlasov D.Yu., Dyatlov D.V., Suracheva N.O., Grigoreva S.V., Korchagin K.A. Statistical characteristics of the variability of the quality of water entering the waterworks // Inzhenernaya ekologiya. 2004. No. 3. P. 2–20 (in Russian).

32. Shevchenko M.A. Physico-chemical substantiation of the processes of decolorization and deodorization of water. Kiev: Naukova dumka, 1973. 151 p. (in Russian).

33. Goronovsky I.T. Physical and chemical substantiation of automation of technological processes of water treatment. Kiev: Naukova dumka, 1975. 216 p. (in Russian).

## Составление геоэкологической карты природоохранных мероприятий

© 2024. О. Б. Наполов<sup>1</sup>, к. т. н., доцент,  
А. П. Кулаков<sup>2</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Московский государственный университет геодезии и картографии,  
105064, Россия, г. Москва, Гороховский пер., д. 4,

<sup>2</sup>Институт геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН,  
101000, Россия, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2, а/я 145,  
e-mail: napolov70@bk.ru, bomberos@inbox.ru

Составление геоэкологической карты является очень сложным и крайне актуальным действием при принятии природоохранных мероприятий по уменьшению техногенного воздействия на окружающую среду в настоящее время. Сама геоэкологическая карта является универсальным и систематизированным картографическим объектом с набором различных по своей структуре и способу обозначения картографических значков с наиболее рациональным уровнем генерализации информации. В общем виде, геоэкологическая карта – свод картографической информации с определённым масштабом и условными обозначениями геоэкологической обстановки, являющихся основой для разработки природоохранных мероприятий на любой территории. Ключевым элементом геоэкологической карты является объективное отражение состояния окружающей среды с учётом данных об источниках и процессах техногенного воздействия. В работе представлены основные требования по составлению геоэкологической карты. Составлена легенда к геоэкологической карте с условными картографическими знаками, используемыми для нанесения процессов и степени экологической напряжённости. В процессе разработки природоохранных решений необходимо учитывать степень техногенной нагрузки и возможности окружающей среды к самовосстановлению с учётом природно-ресурсного потенциала.

**Ключевые слова:** природоохранные требования, геоэкологическая карта, принципы и методы разработки геоэкологической карты.

## Drawing up a geo-ecological map of environmental protection measures

© 2024. O. B. Napolov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0005-1368-4194?  
A. P. Kulakov<sup>2</sup> ORCID: 0009-0009-6837-1055?

<sup>1</sup>Moscow State University of Geodesy and Cartography,  
4, Gorokhovskiy Pereulok, Moscow, Russia, 105064,

<sup>2</sup>Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,  
13, Ulanskii Pereulok, bld. 2, Moscow, Russia, 101000,  
e-mail: napolov70@bk.ru, bomberos@inbox.ru

Drawing up a geo-ecological map is a very complex and highly relevant action when taking environmental protection measures to reduce the technogenic effect on the environment nowadays. The geo-ecological map is a universal and systematized cartographic object with a set of map icons with the most rational level of information generalization. In general, a geo-ecological map is a set of cartographic information with a certain scale and symbols of the geo-ecological situation, which are the basis for the development of environmental protection measures in any territory. The key element of the geo-ecological map is an objective reflection of the state of the environment taking into account data on the sources and processes of technogenic effect. The paper presents the basic requirements for compiling a geo-ecological map. A legend to the geo-ecological map with conventional cartographic signs used to map processes and the degree of environmental stress is compiled. In the process of developing environmental protection solutions, it is necessary to take into account the degree of man-made stress and the environment's potential for self-recovering, taking into account the natural resource potential.

**Keywords:** environmental requirements, geo-ecological map, principles and methods for geo-ecological map drawing.

В настоящее время при реализации природоохранных задач исследователи часто сталкиваются с необходимостью получения актуальной информации об изучаемом объекте исследования (изучаемой территории) с использованием различных источников информации (информационно-аналитических, справочных, картографических материалов, а также данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)). Наиболее объективным инструментом для представления комплексной систематизированной информации на сегодняшний день является тематическая геоэкологическая карта, на которой отражается большое количество необходимых исследователю характеристик экологического состояния окружающей среды в наиболее доступной для пользователя форме. Исходя из этого, разработка требований к геоэкологической карте представляется на сегодняшний день актуальной задачей.

Цель работы – составление геоэкологической карты для реализации природоохранных мероприятий.

### **Материалы и методы исследования**

При практической реализации поставленной задачи, связанной с составлением геоэкологической карты природоохранных мероприятий авторами были использованы данные информационно-аналитических, справочных материалов государственных федеральных, региональных и муниципальных природоохранных ведомств и организаций; полученные от общественных экологических организаций; анализа Интернет-ресурсов.

При реализации поставленной задачи авторами были использованы следующие методы:

- анализ и обработка актуальной картографической информации, полученной от государственных федеральных, региональных и муниципальных природоохранных ведомств и организаций;

- анализ и обработка информационных данных, полученных в результате камеральной обработки и дешифрирования аэрокосмической информации, а также данных информационных отчётов и проектной документации.

При получении картографических материалов авторами был сделан акцент на получение следующих данных:

- результатов проведения экологического мониторинга;

- ландшафтного картографирования территории;

- динамики проявления опасных природных и природно-техногенных процессов;

- ареалов распространения редких и охраняемых биологических видов;

- техногенного загрязнения природных экосистем (атмосферный воздух, поверхностные и подземные воды, почвенно-растительный покров);

- охраняемых природных объектов на территории;

- территорий подтопления, оврагообразования, разрушения береговой линии, просадки и обвалов;

- территорий исчезновения биологических видов;

- трансграничных переносов загрязняющих веществ.

Приведённые картографические материалы с различным масштабом (региональный – 1:1 000 000–1:500 000, локальный – 1:200 000–1:100 000, детальный – масштаб >1:100 000) не являются исчерпывающими, поэтому важным этапом в разработке геоэкологической карты является создание цифровых геоинформационных слоёв различной информационно-аналитической, статистической информации, которая сможет заполнить любой пробел в картографической модели геоэкологической карты.

Важным этапом для составления геоэкологической карты является получение прогнозной оценки возможных активизации природных и природно-техногенных процессов на территории, что является основой формирования природоохранных мероприятий.

При камеральной обработке и дешифрировании аэрокосмической информации авторами был сделан акцент на создание цифровой основы для формирования картографических ГИС-слоёв (координатная сетка, рельеф местности, гидрография, растительность, почвенный покров и тематические слои), а при анализе информационных отчётов и проектной документации – на получение современной экологической информации об изучаемом объекте и территории. При разработке геоэкологической карты необходимым условием является систематизированное представление картографической информации в требуемом для пользователя масштабе для решения конкретных природоохранных управленческих решений. Использованные методы и материалы позволили авторам подойти к составлению геоэкологической карты природоохранных мероприятий.

## Результаты и обсуждение

**Составление требований к геоэкологической карте.** В структуре разработки требований к геоэкологической карте основное место занимают принципы и методы реализации поставленной задачи.

В качестве основных принципов разработки геоэкологической карты могут быть следующие: комплексность, актуальность и доступность информации; учёт региональных особенностей территории; информационная безопасность.

**Принцип комплексности информации** основан на системном многокомпонентном подходе к получению картографической информации. Изображаемые на картографической основе объекты должны быть основаны на учёте различных источников информации, часто не связанных друг с другом. Задачей исследователя является необходимость выделить из многочисленных источников информации наиболее значимые объекты с точки зрения составителя геоэкологической карты. Использование узкого спектра картографической информации нарушает принцип комплексности и влияет на объективную оценку картографического изображения.

**Принцип актуальности информации** основан на использовании информации последних 5 лет исследования, так как динамика различных природных, природно-техногенных и техногенных процессов не позволяет использовать информационные материалы более ранних лет. Структура изменений компонентов природной среды имеет высокий показатель из-за постоянных трансграничных переносов материи и вещества в окружающей среде. Необходимо учитывать данные последних 5 лет исследований в соответствии с требованиями российского природоохранного законодательства.

**Принцип доступности информации** основан на получении сведений, понятных и доступных для большого количества пользователей. Перегруженная излишней информацией карта будет не понятна пользователю. Напротив, структурированная карта с принципом рационального подхода и уровнем генерализации к изображению на карте будет очень понятна и полезна пользователю. Часто для того, чтобы не перегружать картографическую основу излишней информацией, прибегают к диаграммам и гистограммам, которые являются комплексным картографическим объектом, соединяющим в себе несколько разных раз-

ноплановых количественных и качественных показателей территории.

**Принцип учёта региональных особенностей территории.** В мировой картографической практике бытует мнение, что динамика линейных объектов часто во много раз опережает динамику площадных объектов. Как правило, это так. Но в конкретном регионе могут быть отклонения от этого процесса. Например, в районах уничтожения и деградации почвенно-растительного покрова в результате песчаных бурь эти процессы настолько значительны, что меняют площадную окраску деградированной территории буквально на глазах. Таким образом, учёт региональных особенностей оцениваемой территории позволяет судить об объективности наносимой на картографическую основу информации.

**Принцип информационной безопасности** основан на использовании сведений, исключительно не относящихся к секретной информации (КТ), или информации для служебного пользования (ДСП). Использование информации, относящейся к группам КТ или ДСП, на открытых картографических материалах не допускается. В рамках действующего российского законодательства существует ограничение на распространение такой информации в соответствии с [1].

**Составление легенды геоэкологической карты.** Для разработки легенды к геоэкологической карте необходимо проанализировать возможные природные и техногенные процессы на исследуемой территории, после этого выбрать подходящий масштаб и уровень генерализации на картографической основе [2–6]. Результатом выполнения работ будет легенда геоэкологической карты.

В качестве легенды к геоэкологической карте с учётом требований [7–15] могут быть применены следующие обозначения (табл. 1, см. цв. вкладки I, II):

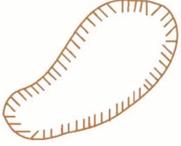
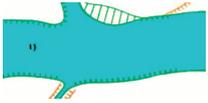
**Составление картографической основы (макета) геоэкологической карты.** Необходимым и достаточным информационным материалом для разработки картографической основы геоэкологической карты является: использование готовой картографической основы на изучаемый объект в заданном масштабе; разработка перечня картографической информации, наносимого на геоэкологическую карту.

В качестве **картографического элемента для разработки картографической основы** геоэкологической карты могут быть использованы: гидрографическая сеть, рельеф, отметки высот, границы административных образова-

**О. Б. Наполов, А. П. Кулаков «Составление геоэкологической карты природоохранных мероприятий». С. 83.**

**Таблица 1 / Table 1**

Картографические значки, используемые для нанесения на геоэкологическую карту  
Cartographic icons used to plot a geo-ecological map

Воздействия Effect	Картографический значок Map icon	Процесс / Process	Примечание / Note
Природные Natural		оврагообразование gullying	динамика образования оврагов (%/год): слабая (<5), незначительная (от 6 до 10); умеренная (11–15), повышенная (16–20); напряжённая (21–30); (критическая (31–40); кризисная (катастрофическая) (>41) dynamics of gully formation (%/year): weak (<5), insignificant (6 to 10); moderate (11–15), increased (16–20); intense (21–30); critical (31–40) ; crisis (catastrophic) (>41)
		затопление в результате природных факторов flooding due to natural factors	масштаб процесса (%): слабый (<5), средний (6–10), напряжённый (11–20), сильный (критический) (21–30), кризисный (катастрофический) (>31) / scale of the process (%): weak (<5), medium (6–10), intense (11–20), critical (21–30), crisis (catastrophic) (>31)
		разрушение береговой линии в результате природных факторов coast-line destruction due to natural factors	масштаб процесса (%): слабый (<5), средний (6–10), напряжённый (11–20), сильный (критический) (21–30), кризисный (катастрофический) (>31) / scale of the coast-line destruction process (%): weak (<5), medium (6–10), intense (11–20), critical (21–30), crisis (catastrophic) (>31)
Техногенные Technogenic		нарушение природного ландшафта / natural landscape disturbance	масштаб нарушения ландшафта (%): слабый (<5), средний (6–10), напряжённый (11–20), сильный (критический) (21–30), кризисный (катастрофический) (>31) / scale of landscape disturbance (%): weak (<5), medium (6–10), intense (11–20), critical (21–30), crisis (catastrophic) (>31)
		захламление территории отходами waste littering	масштаб захламления (%): слабое (<5), незначительное (от 6 до 10); умеренное (11–15), повышенное (16–20); напряжённое (21–30); критическое (31–40); кризисное (катастрофическое) (>41) scale of waste littering (%): weak (<5), insignificant (from 6 to 10); moderate (11–15), increased (16–20); tense (21–30); critical (31–40); crisis (catastrophic) (>41)
		исчезновение биологических видов растительного и животного мира extinction of flora and fauna biological species	масштаб исчезновения биологических видов (% территории): локальный (<9), очаговый (10–19), ареальный (20–49), повсеместный (>50) / scale of biological species extinction (% of territory): local (<9), focal (10–19), areal (20–49), widespread (>50)
		техногенное загрязнение земель / technogenic land pollution	характер распространения загрязнений (% территории): локальный (<9), очаговый (10–19), ареальный (20–49), повсеместный (>50) / nature of the distribution of pollution (% of the territory): local (<9), focal (10–19), areal (20–49), widespread (>50)

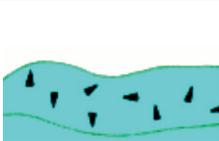
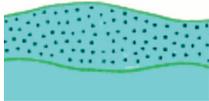
Природно-техногенные Natural-technogenic		обрушение береговой линии в результате техногенного воздействия coastline collapse due to technogenic effect	динамика обрушения береговой линии (%/год): слабая (<5), незначительная (от 6 до 10); умеренная (11–15), повышенная (16–20); напряжённая (21–30); критическая (31–40); кризисная (катастрофическая) (>41) / dynamics of coastline collapse (%/year): weak (<5), insignificant (6 to 10); moderate (11–15), increased (16–20); intense (21–30); critical (31–40); crisis (catastrophic) (>41)
		просадки и обвалы в результате техногенного воздействия на подземные водные источники subsidence and landslides due to technogenic effect on underground water sources	динамика процесса (%/год): слабая (<5), незначительная (от 6 до 10); умеренная (11–15), повышенная (16–20); напряжённая (21–30); критическая (31–40); кризисная (катастрофическая) (>41) / dynamics of the process of subsidence and collapses (%/year): weak (<5), insignificant (from 6 to 10); moderate (11–15), increased (16–20); intense (21–30); critical (31–40); crisis (catastrophic) (>41)
		затопление территории в результате нарушения водного баланса (например, нарушение речного стока) / flooding due to water balance disturbance (e. g. river flow disturbance)	динамика процесса (%/год): слабая (<5), незначительная (от 6 до 10); умеренная (11–15), повышенная (16–20); напряжённая (21–30); критическая (31–40); кризисная (катастрофическая) (>41) / dynamics of the territory flooding process (%/year): weak (<5, insignificant (from 6 to 10); moderate (11–15), increased (16–20); intense (21–30); critical (31–40); crisis (catastrophic) (>41)

Таблица 2 / Table 2

Картографические значки, используемые для нанесения степени экологической напряжённости  
Cartographic icons used to plot the degree of environmental stress

Картографический значок / Map icon	Степень экологической напряжённости Environmental stress degree	Примечание / Note
	условно благоприятная conditionally favorable	устойчивая экологическая обстановка на повсеместном уровне / sustainable environmental conditions everywhere
	удовлетворительная satisfactory	начальная стадия деградации природных экосистем на локальном уровне / the initial stage of degradation of natural ecosystems at the local level
	напряжённая / intense	напряжённая стадия деградации природных экосистем на очаговом уровне / intense stage of degradation of natural ecosystems at the focal level
	критическая / critical	критическая стадия деградации природных экосистем на ареальном уровне / critical stage of degradation of natural ecosystems at the areal level
	кризисная / crisis	повсеместная деградация природных экосистем с опасными последствиями для компонентов окружающей среды, а также для жизни и здоровья человека widespread degradation of natural ecosystems with dangerous consequences for environmental components, as well as for human life and health

ний, инфраструктурные объекты (дороги, коммуникации, границы, населённые пункты).

В качестве **перечня картографической информации, наносимого на геоэкологическую карту**, могут быть использованы степень экологической напряжённости на территории; перечень применяемых природоохранных решений для смягчения техногенных процессов.

В качестве степени экологической напряжённости могут быть использованы следующие картографические значки (табл. 2, см. цв. вкладку II).

В качестве природоохранных решений для смягчения техногенных воздействий могут быть использованы следующие картографические значки (табл. 3). Природоохранные решения, указанные в таблице 3, могут иметь регулятивный или рекомендательный характер. Кроме того, ограничения хозяйственной деятельности могут иметь узко сегментарный характер (например, ограничение на лов рыбы).

**Составление геоэкологической карты.** На этапе составления окончательной версии геоэкологической карты необходимо:

- уточнить перечень наносимой на картографическую основу информации;
- использовать только выверенную информацию из надёжных и достоверных источников;
- использовать только официально полученную географическую подложку с нанесением рельефа местности (цифровая модель рельефа) и добавлением объектов инфраструктуры (АО «Роскартография»);
- сформировать пакет необходимой информации для её включения в цифровой вариант для создания ГИС-слоёв;
- использовать только сертифицированные картографические геоинформационные продукты (ГИС MapInfo, ArcGIS и др.).

Использование выше названных принципов должно согласовываться с учётом следующих особенностей составления картографической продукции: объективности картографической информации; принципа формирования важной информации; принципа учёта мнений экспертной группы и управленческих кадров, влияющих на природоохранную политику на территории.

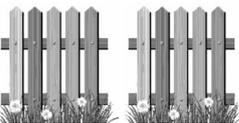
**Принцип объективности картографической информации** основан на использовании только достоверной информации, основанной на учёте проверенных данных официальных органов власти и природоохранных ведомств.

**Принцип формирования важной информации** основан на учёте основополагающих критериев, влияющих на приоритетность в изображении картографической информации на территории. К числу важной информации относятся границы, объекты инфраструктуры, населённые пункты, природные и природно-техногенные процессы, степень экологической напряжённости на территории, опасные техногенные процессы на территории.

**Принцип учёта мнений экспертной группы** основан на учёте мнений высококвалифицированных специалистов в экологической сфере. Их мнение особенно важно для объективного подхода к нанесению картографической информации на геоэкологической карте. Принцип выбора мнений экспертного лица основан на всеобщем признании этого человека в рядах ведущих отечественных и мировых объединений, например, Российская Академия Наук, руководителей ведущих экологических организаций и объединений в экологической сфере.

**Принцип учёта мнений управленческих кадров, влияющих на природоохранную политику на территории**, основан на учёте действующих нормативно-правовых до-

Таблица 3 / Table 3  
 Картографические значки, используемые для нанесения природоохранных решений  
 Cartographic icons used to map environmental solutions

Картографический значок Map icon	Природоохранное решение Environmental solution
	ограничение хозяйственной деятельности restriction of economic activity
	необходимость организации рекреационных территорий / the need to organize recreational areas

кументов в области экологической безопасности, а также природоохранных решений в сфере экологической безопасности, принятых в качестве руководящих документов в настоящее время на территории. Особенно ценными для учёта этого принципа являются природоохранные решения (руководства, стратегии, программы и др.), рассчитанные на длительный период.

Разработанные требования к геоэкологической карте в рамках реализации природоохранных решений могут служить залогом экологической безопасности и рационального природопользования на территории.

### Заключение

Дальнейшие исследования авторов могут быть связаны с разработкой тематических слоёв для геоэкологической карты на любую территорию с использованием геоинформационных ресурсов. В качестве примера применения предложенных авторами подходов к созданию тематических слоёв ГИС (рельеф местности, гидрография, растительность, почвенный покров, функциональное зонирование и инфраструктурные объекты, ареалы антропогенных нагрузок, загрязнений и др.) можно отметить приведённую в публикации легенду к геоэкологической карте, которая разделена на картографические значки, используемые для нанесения данных на геоэкологическую карту; используемые для нанесения степени экологической напряжённости и используемые для нанесения природоохранных решений.

Новизна данного исследования связана с тем, что авторам впервые удалось собрать и систематизировать различную структурно-функциональную информацию от различных источников и разработать комплексную легенду к геоэкологической карте, разделённую на несколько тематических слоёв. При этом следует понимать, что для разработки геоэкологической карты необходимо плотное сотрудничество специалистов разных областей (от ландшафтоведа до эколога) и разработка специальных тематических слоёв, которые обеспечат качественную и объективную информацию на геоэкологической карте. При разработке этих слоёв должны быть использованы материалы дистанционных исследований. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на разработку генерированной информации для отдельных территориальных субъектов РФ.

Основными требованиями к геоэкологической карте являются:

- наличие основных техногенных воздействий на окружающую среду (по категориям: природные, природно-техногенные и техногенные);
- наличие процессов техногенного воздействия на окружающую среду (по категориям: природные, природно-техногенные и техногенные);
- степень экологической напряжённости территории (по категориям: условно-благоприятная, удовлетворительная, напряжённая, критическая, кризисная);
- отдельные картографические объекты, связанные с ограничением хозяйственной деятельности на территории.

### Литература

1. Наполов О.Б., Кулаков А.П. Критерии типизации различных экологических ситуаций на муниципальном уровне // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2022. № 3. С. 66–69.
2. Макарова Н.М., Балашев А.Л., Тойгильдин А.М., Свирицкий А.Г. Особенности создания систем автоматического контроля загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 4. С. 35–43. doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-035-043
3. Жаворонков В.И., Захаров В.Ю., Резник Е.Н., Сабашный Д.В. Методы электронной оптики для изучения результатов воздействия антропогенных факторов на биологические объекты // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 29–30. doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-029-030
4. Садов А.В., Наполов О.Б. Роль и значение природно-ресурсного потенциала при разработке эколого-сбалансированного развития региона // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 2. С. 21–27. doi: 10.25750/1995-4301-2011-2-021-027
5. Садов А.В., Наполов О.Б. Методология оценки природно-ресурсного потенциала в современном экономическом развитии регионов // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 15–19. doi: 10.25750/1995-4301-2009-3-015-019
6. Юзефович А.М., Кошелева Н.Е. Загрязнение почв селитебной зоны Москвы и его связь с природными и антропогенными факторами // Теоретическая и прикладная экология. 2009. № 3. С. 35–42. doi: 10.25750/1995-4301-2009-3-035-042
7. Курбатова И.Е. Разработка структуры научно-справочного картографирования природной среды Кумо-Манычской впадины для целей экологической экспертизы // Аридные экосистемы. 2010. Т. 16. № 1. С. 66–75.

8. Нигматов А.Н., Абдиреймов С.Ж., Расулов А.Б. Опыт использования «ГИС» технологий в разработке геоэкологических карт // Global Science and Innovations 2020. Proceedings. Tashkent: Eurasian Center of Innovative Development «DARA», 2020. С. 208–213.

9. Олзоев Б.Н., Данценко О.В. Геоинформационное картографирование экологической напряжённости (на примере бассейна реки Ангары и Иркутского водохранилища) // XXI век. Техносферная безопасность 2016. Т. 1. № 2. С. 56–60.

10. Олзоев Б.Н., Котельникова Н.В. Геоинформационное картографирование обеспеченности туристическими объектами территории Иркутской области // Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия: сб. материалов междунар. науч. конф. Т. 2. Новосибирск: СГУГиТ, 2015. С. 46–49.

11. Кочуров Б.И., Шишкина Д.Ю., Антипова А.В. Костовска С.К. Геоэкологическое картографирование. М.: Академия, 2009. 192 с.

12. Раклов В.П. Картография и ГИС. М.: Академический Проект, 2014. 224 с.

13. Хохлова Е.С., Осадчая Г.Г., Овчарук Т.А. Экологическое картографирование. Ухта: УГТУ, 2013. 252 с.

14. Комплексное экологическое картографирование / под ред. Н.С. Касимова. М.: Изд-во МГУ, 1997. 147 с.

15. Лунев Б.С., Красильников П.А., Иларионов С.А., Спасский Б.А., Наумов В.А. Картирование территории при проведении геоэкологического мониторинга средствами ГИС // Фундаментальные исследования. 2014. № 11-1. С. 89–93.

4. Sadov A.V., Napolov O.B. Role and meaning of natural resources at working out ecologically balanced development of the region // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 2. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-2-021-027

5. Sadov A.V., Napolov O.B. Estimation Methods of natural resources potential in conditions of contemporary development of region // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 3. P. 15–19 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-3-015-019

6. Jusephovich A.M., Kosheleva N.E. Contamination of soils in residential areas of Moscow and its relation with natural and anthropogenic factors // Theoretical and Applied Ecology. 2009. No. 3. P. 35–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2009-3-035-042

7. Kurbatova I.E. Development of scientific-reference mapping structure for Kumo-Manych depression environment with a view of ecological expert examination // Arid Ecosystems. 2010. V. 16. No. 1. P. 66–75 (in Russian).

8. Nigmatov A.N., Abdireymov S.Zh., Rasulov A.B. Experience in using “GIS” technology in the development of geoecological maps // Global Science and Innovations 2020. Proceedings. Tashkent: Eurasian Center of Innovative Development “DARA”, 2020. P. 208–213 (in Russian).

9. Olzoev B.N., Dantsenko O.V. GIS mapping of ecological tension (case-study of Angara River basin and Irkutsk reservoir) // XXI century: Technosphere safety. 2016. No. 2. P. 56–60 (in Russian).

10. Olzoev B.N., Kotelnikova N.V. GIS mapping provision tourist objects in the Irkutsk region // Geodesy, geoinformatics, cartography, surveying: sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. V. 2. Novosibirsk: SGUGiT, 2015. P. 46–49 (in Russian).

11. Kochurov B.I., Shishkina D.Yu., Antipova A.V. Kostovska S.K. Geoecological mapping. Moskva: Akademiya, 2009. 192 p. (in Russian).

12. Raklov V.P. Cartography and GIS. Moskva: Akademicheskiiy Proekt, 2014. 224 p. (in Russian).

13. Khokhlova E.S., Osadchaya G.G., Ovcharuk T.A. Environmental mapping. Ukhta: USTU, 2013. 252 p. (in Russian).

14. Integrated environmental mapping / Ed. N.S. Kasimov. Moskva: Moscow State University Publishing House, 1997. 147 p. (in Russian).

15. Lunev B.S., Krasilnikov P.A., Ilarionov S.A., Spasskiy B.A., Naumov V.A. Territory mapping for geoecological monitoring with GIS // Fundamental research. 2014. No. 11-1. P. 89–93 (in Russian).

## References

1. Napolov O.B., Kulakov A.P. Criteria for typing various environmental situations at the municipal level // Use and Protection of Natural Resources in Russia. 2022. No. 3. P. 66–69 (in Russian).

2. Makarova N.M., Balashev A.L., Toygildin A.M., Svirskiy A.G. Features of creating systems for automatic control of pollutants from stationary sources of emission // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 35–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-035-043

3. Zhavoronkov V.I., Zakharov V.Yu., Reznik E.N., Sabashny D.V. Electron optics methods for studying the results of anthropogenic impact on biological objects // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 1. P. 29–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-1-029-030

## Методы контроля и мониторинга фосфорорганических соединений в природных средах

© 2024. О. Ю. Растегаев<sup>1</sup>, д. х. н., профессор,  
Т. Я. Ашихмина<sup>2,3</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,  
С. Н. Черников<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
410054, Россия, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77,

<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>3</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: Rastegaev.O@yandex.ru

Предложены методы контроля и мониторинга фосфорорганических соединений в природных средах при утилизации фосфорорганических соединений (ФОС – Vх). Установлено, что экологические нормативы контроля и нормативы качества природных сред при этом не превышены. Экологический контроль проводился как плановый контроль источников загрязняющих веществ (выбросов, сбросов, технологических вод, отходов и реакционных масс), а при экологическом мониторинге осуществлялся анализ основных объектов природной среды (атмосферный воздух, почвенный покров, поверхностные и грунтовые воды, снежный покров). Объем проводимых экоаналитических исследований в рамках экологического контроля и мониторинга составляли 200 участков и объектов контроля и мониторинга, более 250 показателей. Поверхностные и грунтовые воды, снежный покров контролировались по 57 показателям, атмосферный воздух – по 10 показателям, почвенный покров, донные отложения – по 11 показателям. Представлены сводные данные государственного экологического контроля и мониторинга в 2006–2009 гг. в период утилизации фосфорорганических соединений (ФОС – Vх). Дополнена и внедрена методическая база экоаналитического обеспечения при утилизации ФОС, разработано и адаптировано 14 методик определения фосфорсодержащих веществ: О-изобутилметилфосфоната, метилфосфоновой кислоты, их суммарного содержания (показатель «общий фосфор»). В основу разработки методик положено обоснование диапазонов определяемых концентраций с учётом технологических параметров процессов утилизации, экспериментальное обоснование методик пробоотбора, пробоподготовки и аналитического окончания на целевых веществах. Данные методики были апробированы на реальных объектах контроля и мониторинга и аттестованы в установленном порядке. Процесс утилизации ФОС проходил в штатном режиме – ФОС и продукты их деструкции в объектах окружающей среды за весь период наблюдений не обнаружены, отрицательного влияния на окружающую среду не установлено.

**Ключевые слова:** экологический контроль, экологический мониторинг, фосфорорганические соединения, экологические нормативы контроля, нормативы качества природных сред.

## Methods of control and monitoring of organophosphorus compounds in natural environments

© 2024. O. Y. Rastegaev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-0936-1198<sup>2</sup>

T. Ya. Ashikhmina<sup>2,3</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047<sup>3</sup>

S. N. Chernikov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-7622-631X<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.,  
77, Politechnicheskaya St., Saratov, Russia, 410054,

<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>3</sup>Institute of Biology of the Komi Scientific Center  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: Rastegaev.O@yandex.ru

Methods of control and monitoring of organophosphorus compounds in natural environments while organophosphorus compounds (OPCs – Vx) utilization are proposed. It was found that environmental control standards and quality standards of natural environments were not exceeded. Environmental control was carried out as a planned control of pollutant sources (emissions, discharges, process waters, waste and reaction masses), while environmental monitoring analyzed the main objects of the natural environment (atmospheric air, soil cover, natural and groundwater, snow cover) was carried out. The volume of eco-analytical studies conducted within the framework of environmental control and monitoring amounted to 200 plots and objects of control and monitoring, more than 250 indicators. Natural water, groundwater, snow cover were monitored according to 57 indicators, atmospheric air – for 10 indicators, soil cover, bottom sediments – for 11 indicators. Summary data of the state environmental control and monitoring in 2006–2009 during the period of utilization of organophosphorus compounds (FOS – Vx) are presented. The methodological base of eco-analytical support for the utilization of FOS has been supplemented and implemented, 14 methods for the determination of phosphorus-containing substances – O-isobutylmethylphosphonate, methylphosphonic acid, their total content (the indicator “total phosphorus”) were developed and adapted. The development of methods is based on the justification of the ranges of determined concentrations, taking into account the technological parameters of the disposal processes, experimental justification of sampling, sample preparation and analytical termination on target substances. These methods were tested on real control and monitoring objects and certified in accordance with the established procedure. The OPCs disposal process was carried out normally. No OPCs and their degradation products were detected in environmental objects during the entire observation period, and no negative environmental effect was established.

**Keywords:** environmental control, environmental monitoring, organophosphorus compounds, environmental control standards, environmental quality standards.

Различным аспектам экологического контроля и мониторинга при утилизации отравляющих веществ в литературе уделяется постоянное внимание [1–5]. В процессе деструкции фосфорорганических соединений (ФОС) образуются сложные по составу реакционные массы, содержащие как органические, так и неорганические фосфорсодержащие компоненты [1, 2]. Деструкция ФОС может быть проведена методом алкоголиза в сильно основных средах. После осуществления процесса компоненты не разделяются [1], следовательно, общее содержание гетероатомов, например, фосфора, азота или серы, должно оставаться неизменным с учётом метрологических характеристик технологии. Поэтому в качестве такого «общего» показателя оценки и состояния природных сред выбран показатель «общий фосфор». Кроме того, таким методом дополнительно можно определять общий азот и общую серу.

Цель данного исследования – разработка новых методов экологического контроля и мониторинга фосфорорганических соединений в дополнение к существующим и их апробация на объекте по хранению и уничтожению химического оружия в пгт. Марадыковский Кировской области (объекте УХО).

### Объекты и методы исследования

Разработке методологии проведения экологического контроля и мониторинга постоянно уделяется большое внимание [6–10], поскольку происходящие изменения в окружающей среде требуют соответствующих

корректировок и применения новых методов исследований [11–15]. Различным аспектам определения супертоксикантов в природных средах также уделяется постоянное внимание [16–19]. Разработанные ранее методические подходы [3, 4, 20–24] для определения технических параметров системы экологического контроля и мониторинга, а также методическая база экоаналитического обеспечения [3, 11, 25–27] при утилизации ФОС были впервые применены на объекте УХО. В соответствии с нормативными документами (Постановление Правительства РФ от 14 марта 2024 г. № 300, Приказ МПР РФ от 30 июля 2020 года № 524, Приказ МПР РФ от 22 ноября 2019 г. № 794, ГОСТ Р 53009-2008) при проведении экологического мониторинга основными требованиями являются: неизменность характеристик выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) источниками выбросов в радиусе до 5 км от пункта наблюдений, неизменность методик отбора и анализа проб воздуха, а также фон, который определяется для источников выбросов объекта на срок действия проектной документации объекта. При этом фон определяется по выборке данных из однородных рядов наблюдений на пунктах наблюдений за пятилетний период. Поэтому анализ данных экологического контроля и мониторинга при утилизации ФОС типа Vx (O-изобутил-S-(2-диэтиламиноэтил) метилтиофосфоната) проводился за период 2006–2009 гг.

Представленный материал является обобщением данных, полученных в Региональном центре системы государственного экологического контроля и мониторинга объекта

по хранению и уничтожению химического оружия на объекте «Марадыковский» Кировской области (РЦ СГЭКиМ). Дополнена и внедрена методическая база экоаналитического обеспечения СГЭКиМ при утилизации ФОС, разработано и адаптировано 14 методик определения фосфорсодержащих веществ: О-изобутилметилфосфоната, метилфосфоновой кислоты, их суммарного содержания (показатель «общий фосфор»). В основу разработки методик положено обоснование диапазонов определяемых концентраций с учётом технологических параметров процессов утилизации, экспериментальное обоснование методик пробоотбора, пробоподготовки и аналитического определения на целевых веществах.

При утилизации ФОС типа Vx [1, 2] образуется О-изобутилметилфосфонат, который может попадать в природные среды, в которых он гидролизует до метилфосфоновой кислоты (МФК). Основным аналитическим методом определения ФОС из-за высокой чувствительности и специфичности является хроматографический метод с фотометрическим или масс-спектрометрическим детектированием [11, 15, 20, 28–30]. Для повышения летучести высококипящих МФК и её изобутилового эфира, их переводят в полные эфиры путём алкилирования диазометаном или диметилсульфатом, что делает их пригодными для хроматографического определения [11].

Разработанные методики предназначены для реализации на газовых хроматографах отечественного и импортного производства, снабжённых пламенно-фотометрическими детекторами.

В качестве базовой схемы для разработки методик определения общего фосфора как суммы ФОС была выбрана схема окислительной минерализации пробы с последующим определением фосфора в форме молибденового комплекса фотометрическим методом, что является наиболее отработанным и высокочувствительным способом определения фосфатов [31–35]. Указанный способ определения заключается в образовании фосфорсодержащих молибденовых гетерополикислот с предварительным концентрированием с последующим восстановлением аскорбиновой кислотой в присутствии катализатора сурьмяно-виннокислого калия в комплексное соединение, окрашенное в синий цвет. Важным аспектом является тот факт, что в соответствии с РД 52.04.186-89 данный способ используется практически всеми лаборато-

риями страны в сети гидрометеорологических, санитарно-гигиенических и экологических исследований при определении фосфатов [34–36], что обеспечит быстрое внедрение разработанных методик определения общего фосфора в лабораторную практику. Высокую эффективность показала окислительная система нитрат калия – серная кислота, минерализация протекает за 30–45 мин, окрашивание раствора наблюдается при концентрации МФК с содержанием общего фосфора от 0,001 мг/дм<sup>3</sup>.

Разработанные методики были апробированы на реальных объектах контроля и мониторинга и аттестованы в установленном порядке. В настоящее время действующие новые стандарты СанПиН по почве, воде, воздуху включают определение многих специфических ЗВ и разработанные утверждённые методики могут применяться для их определения, кроме того, данные ФОС могут появляться в природных средах при использовании фосфорсодержащих средств защиты растений, средств пожаротушения и антипиренов.

Перед началом производственной деятельности были проведены фоновые исследования состояния окружающей среды для получения фоновых показателей, с которыми в дальнейшем сравнивались полученные значения показателей мониторинга и контроля. Результаты этих исследований позволяют оценивать воздействие объекта УХО на окружающую среду в течение всего срока его функционирования и делать достоверные выводы.

На объектах контроля и мониторинга проводился плановый контроль источников ЗВ (выбросов, сбросов технологических вод, отходов и реакционных масс), а также мониторинг основных объектов природной среды (атмосферный воздух, почвенный покров, поверхностная и грунтовая вода, снежный покров).

## Результаты и обсуждение

Аналитические исследования в рамках экологического контроля и мониторинга на промплощадке и территории вблизи объекта УХО проводились на 200 источниках и участках контроля по более чем 250 показателям. Поверхностная вода, грунтовые воды, снежный покров контролировались по 57 показателям, атмосферный воздух – по 10 показателям, почвенный покров, донные отложения – по 11 показателям.

В соответствии с действующими нормативными документами, указанными выше,

объекты экологического контроля (4 объекта) и мониторинга (3 объекта) должны быть все обеспечены инструментальными методиками, включая продукты деструкции, поэтому всего было разработано и адаптировано 14 методик определения фосфорсодержащих веществ: О-изобутилметилфосфоната, метилфосфоновой кислоты, их суммарного содержания (показатель «общий фосфор»), отличающихся по объектам анализа и диапазонам определяемых концентраций целевых веществ. Разработанные методики измерений позволяют контролировать нормативы экологического контроля на территории предприятия и нормативы контроля природных сред в санитарно-защитной зоне и зоне влияния объекта.

На рисунках 1–3 представлена динамика выбросов ФОС – О-изобутилметилфосфоната (утилизация ФОС и площадки хранения реакционной массы), а также выбросов продуктов сгорания от печей сжигания отходов. Как видно из представленных диаграмм, за период утилизации ФОС не наблюдалось превышений установленных нормативов предельно допустимых выбросов.

Продукты деструкции вещества типа Vx, как и сам Vx, в почвах не обнаружены. Показатель «общий фосфор» изменялся от 0,2 до 21,7 мг/кг, при этом наибольшие зна-

чения наблюдались на северо-западе от пгт Мирный (13–21,7 мг/кг), минимальные значения на юге от пгт. Мирный (0,2–10,9 мг/кг), что удовлетворительно соотносится со значениями таких показателей как фосфаты, О-изобутилметилфосфонат, МФК.

Таким образом, процесс утилизации ФОС на объекте УХО проходил в штатном режиме – ФОС и продукты их деструкции в объектах окружающей среды за весь период наблюдений не обнаружены, отрицательного влияния на окружающую среду не установлено.

### Заключение

Предложены методы контроля и мониторинга ФОС в природных средах при их утилизации, при этом экологические нормативы контроля и качества природных сред не превышены, проанализированы результаты исследования состава объектов экологического контроля (промышленных выбросов, сбросов, отходов) и объектов экологического мониторинга в зоне защитных мероприятий (атмосферного воздуха, поверхностных и грунтовых вод, снежного покрова, донных отложений и почв) при утилизации ФОС с использованием разработанных принципов и методических подходов, включая определе-

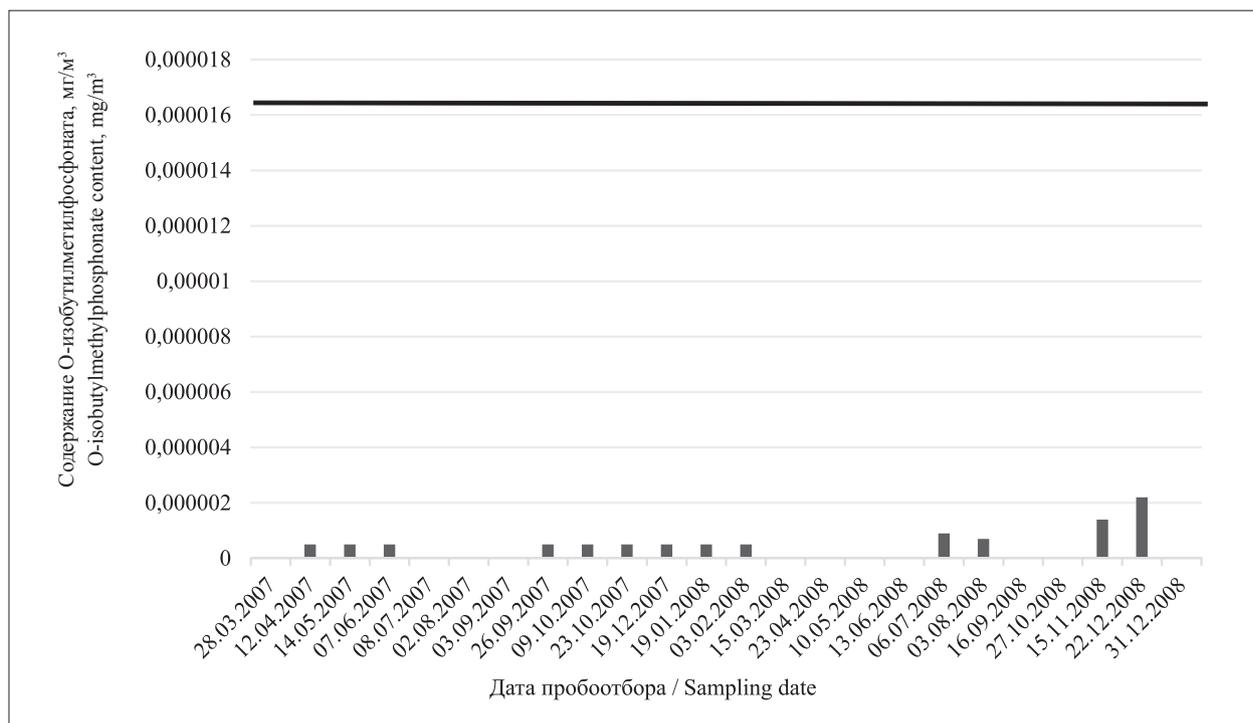
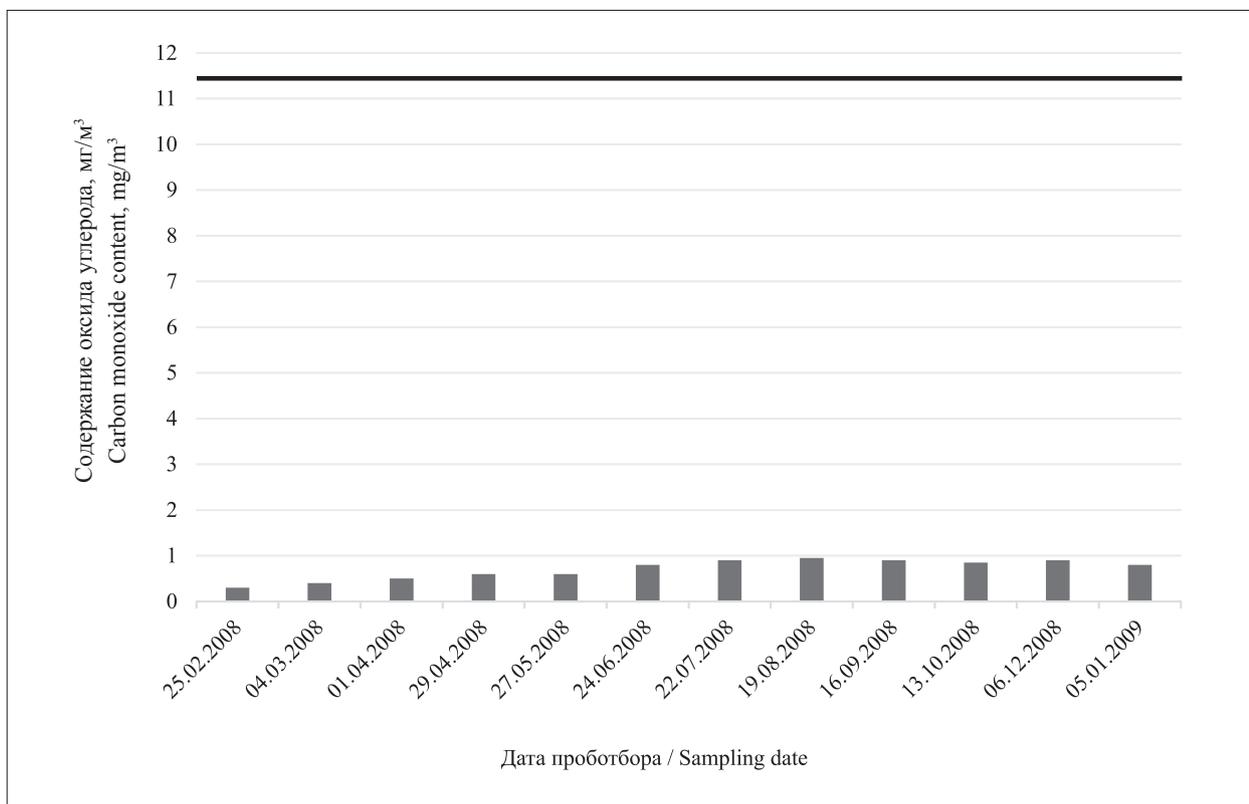
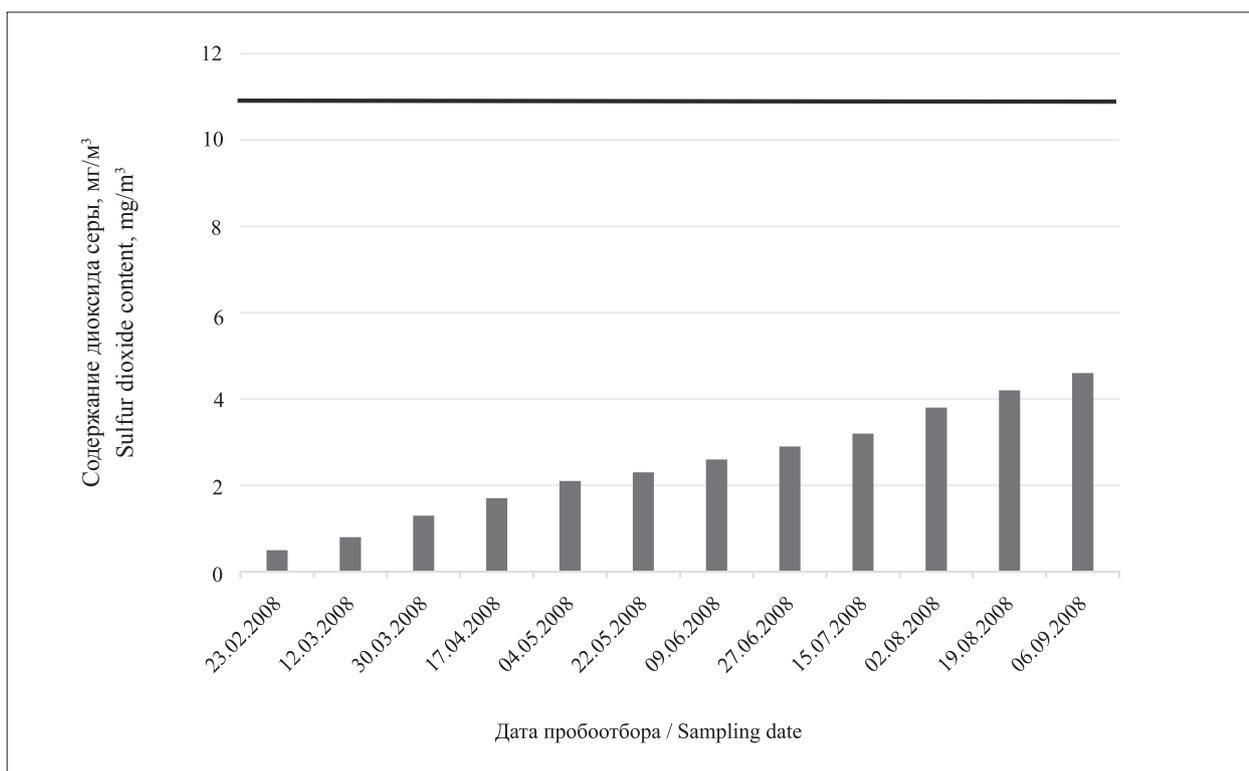


Рис. 1. Содержание О-изобутилметилфосфоната в мг/м<sup>3</sup> в выбросах источника выбросов № 0032 в различные даты определения

Fig. 1. The O-isobutylmethylphosphonate content (mg/m<sup>3</sup>) in emissions from emission source No. 0032 at various determination dates



**Рис. 2.** Содержание оксида углерода в мг/м³ в выбросах источника выбросов № 0001 в различные даты определения  
**Fig. 2.** Carbon monoxide content (mg/m³) in emissions from emission source No.0001 at various determination dates



**Рис. 3.** Содержание диоксида серы в мг/м³ в выбросах источника выбросов № 0001 в различные даты определения  
**Fig. 3.** Sulfur dioxide content in mg/m³ in emissions from emission source No. 0001 at various determination dates

ние органических компонентов – ФОС, продуктов их деструкции и общего фосфора.

Введённый показатель «общий фосфор» в практику экологического контроля и мониторинга удовлетворительно соотносится со значениями таких показателей как фосфаты, О-изобутилметилфосфонат, метилфосфоновая кислота.

Разработано, адаптировано и аттестовано 14 методик определения фосфорсодержащих веществ, дополнена и внедрена методическая база экоаналитического обеспечения при утилизации ФОС, при этом разработанные методики могут использоваться при определении фосфорсодержащих соединений (пестицидов, компонентов отходов и продуктов их превращения) в экологическом контроле и мониторинге территорий при ликвидации полигонов, на объектах по утилизации промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов.

### References

- Zhdanov V.A., Koshelev V.M., Novikov V.K., Shvalov A.A. Methods of destruction of organophosphorus toxic substances // *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 1993. V. 37. No. 3. P. 22–25 (in Russian).
- Utkin A.Yu., Lieberman A.Yu., Kondratiev V.B., Kapashin V.P., Kholstov V.I. Mathematical description processes of detoxification of organophosphorus toxic substances // *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2007. V. LI. No. 2. P. 12–17 (in Russian).
- Ashikhmina T.Ya. Integrated environmental monitoring of chemical weapons storage and destruction facilities. Kirov: Vyatka, 2002. 544 p. (in Russian).
- Odum Y.P. Ecology. In 2 volumes. V. 2. Moskva: Mir, 1986. 328 p. (in Russian).
- Advanced monitoring and numerical analysis of coastal water and urban air environment / Eds. H. Furumai, S. Sato, M. Kamata, K. Yamamoto. Tokyo: Springer, 2010. 164 p. doi: 10.1007/978-4-431-99720-7
- Advanced environmental monitoring / Eds. Y.J. Kim, U. Platt. Dordrecht: Springer, 2007. 416 p. doi: 10.1007/978-1-4020-6364-0
- Israel Yu.A. Ecology and control of the state of the natural environment. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979. 376 p. (in Russian).
- Environmental monitoring of hazardous production facilities: the experience of creation and prospects for development (using the example of environmental control and monitoring systems for the destruction of chemical weapons) / Ed. V.N. Chupis. Moskva: Nauchnaya kniga, 2010. 526 p. (in Russian).
- Chupis V.N., Rastegaev O.Yu., Kapashin V.P., Fedotov S.A., Kondakov I.A. The system of state environmental control and monitoring of chemical weapons storage facilities and chemical weapons destruction facilities (structure, functionality, operational experience) // *Federal and regional problems of chemical destruction weapons: collection of VINITI RAS*. No. 5. Moskva: VINITI, 2005. P. 88–102 (in Russian).
- Rastegaev O.Yu., Chupis V.N., Maryin V.I., Skvortsov I.M., Chernikov S.N. Organophosphorus toxic substances. Properties and methods of determination. Saratov: Publishing house of LLC “Fiesta-2000”, 2009. 219 p. (in Russian).
- Rybal’chenko I.V., Baigil’diev T.M., Rodin I.A. Chromato-mass spectrometric methods for determining markers and biomarkers of toxic substances // *Zhurnal analiticheskoy khimii*. 2021. V. 76. No. 1. P. 32–50 (in Russian). doi: 10.31857/S0044450221010114
- Shtykov S.N., Kobtsov S.N., Ilyasov I.H., Isaev I.N., Dubrovsky D.S., Yazinin S.V. State standard samples of the composition of toxic chemicals and their detoxification products in the system of environmental control and monitoring of chemical weapons destruction facilities // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 4. P. 57–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-4-057-062
- Shoeib M., Harner T. Characterization and comparison of three passive air samplers for persistent organic pollutants // *Environ. Sci. Technol*. 2002. V. 36. No. 19. P. 4142–4151. doi: 10.1021/es020635t
- Pardasani D., Palit M., Gupta A., Shakya P., Sekhar K., Dubey D. Sample preparation of organic liquid for off-site analysis of chemical weapons convention related compounds // *Anal. Chem*. 2005. V. 77. No. 4. P. 1172–1176. doi: 10.1021/ac0486138
- Sokolov F.P., Sizykh I.N., Milgotin I.M., Samsonov V.A., Shvetsova-Shilovskaya T.N., Gulin A.A. Environmental aspects of the destruction of chemical weapons // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 4. P. 50–57 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-4-050-057
- Efremenko E.N., Lyagin I.V., Gudkov D.A., Sirotkina M.S., Zavyalova N.V., Zavyalov V.V., Varfolomeev S.D., Kholstov V.I. Immobilized biocatalysts based on organophosphate hydrolase in the decomposition of organophosphate toxic substances // *Theoretical and Applied Ecology*. 2011. No. 4. P. 26–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-4-026-031
- Sinha Roy K., Goud D.R., Chandra B., Dubey D.K. Efficient extraction of sulfur and nitrogen mustards from nonpolar matrix and an investigation on their sorption behavior on silica // *Anal. Chem*. 2018. V. 90. No. 14. P. 8295–8299. doi: 10.1021/acs.analchem.8b02157
- Montauban C., Bégos A., Bellier B. Extraction of nerve agent VX from soils // *Anal. Chem*. 2004. V. 76. No. 10. P. 2791–2797. doi: 10.1021/ac035441q
- Prokofiev D.S., Shmurak V.I., Sadovnikov S.V., Goncharov N.V. Problems of determination of organophosphorus toxic substances by biochemical methods at chemical weapons destruction facilities // *Theoretical and*

- Applied Ecology. 2011. No. 4. P. 99–102 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-4-099-102
20. Rohrbaugh D.K., Sarver E.W. Detection of alkyl methylphosphonic acids in complex matrices by gas chromatography-tandem mass spectrometry // *J. Chromatogr.* 1998. V. 809. P. 141–150. doi: 10.1016/S0021-9673(98)00184-8
21. Le Moullec S., Bégos A., Pichon V., Bellier B. Selective extraction of organophosphorus nerve agent degradation products by molecularly imprinted solid-phase extraction // *J. Chromatogr. A.* 2006. V. 1108. P. 7–13. doi: 10.1016/j.chroma.2005.12.105
22. Kondratiev V.B., Korolkov M.V., Kostikova N.A., Rysyuk L.N., Shibkov O.O. Methodological approaches to the processing of salt waste generated during thermal neutralization of reaction masses from organophosphorus toxic substances at chemical weapons destruction facilities // *Theoretical and Applied Ecology.* 2011. No. 4. P. 38–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2011-4-038-042
23. Kanaujia P.K., Pardasani D., Tak V., Purohit A., Dubey D.K. Selective enrichment of the degradation products of organophosphorus nerve agents by zirconia based solid-phase extraction // *J. Chromatogr. A.* 2011. V. 1218. No. 38. P. 6612–6620. doi: 10.1016/j.chroma.2011.07.091
24. Rodin I.A., Braun A.V., Stavrianidi A.N., Shpigun O.A., Ribalshenko I.V. Detection of biomarkers of nerve agents by liquid chromatography tandem mass spectrometry // *Analitika i kontrol.* 2012. V. 16. No. 3. P. 254–259 (in Russian).
25. Rodin I.A., Brown A.V., Baigildiev T.M., Ananyeva I.A., Shpigun O.A., Rybalchenko I.V. Determination of products of hydrolytic transformation of toxic substances VX and VR in natural waters by liquid chromatography-mass spectrometry // *Mass spectrometria.* 2015. V. 12. No. 2. P. 100–106 (in Russian).
26. Koryagina N.L., Savel'eva E.I., Khlebnikova N.S., Ukolov A.I., Ukolova E.S., Karakashev G.V., Radilov A.S. Chromatography-mass spectrometry determination of alkyl methylphosphonic acids in urine // *J. Anal. Chem.* 2016. V. 71. P. 1309–1318. doi: 10.1134/S1061934816140069
27. Zhang M., Liu Y., Chen J., Liu H., Lu X., Wu J., Zhang Y., Lin Y., Liu Q., Wang H., Guo L., Gao R., Xu B., Xie J. Sensitive untargeted screening of nerve agents and their degradation products using liquid chromatography-high resolution mass spectrometry // *Anal. Chem.* 2020. V. 92. No. 15. P. 10578–10587. doi: 10.1021/acs.analchem.0c01508
28. Garg P., Purohit A., Tak V.K., Kumar A., Dubey D.K. Liquid-liquid-solid microextraction and detection of nerve agent simulants by on-membrane Fourier transform infrared spectroscopy // *Anal. Chim. Acta.* 2012. V. 751. P. 71–78. doi: 10.1016/j.aca.2012.09.013
29. Li B., Wei J., Kong J., Qin M., Yang L., Li C. Rapid detection of Sarin hydrolysis products based on microextraction by packed sorbent combined with Nano-ESI mass spectrometry // *Int. J. Mass Spectrom.* 2021. V. 461. Article No. 116513. doi: 10.1016/j.ijms.2020.116513
30. Rastegaev O.Yu., Chupis V.N. “Modular” method of organization of analytical laboratories of the system of state environmental control and monitoring of facilities for storage and destruction of chemical weapons // *Theoretical and Applied Ecology.* 2008. No. 4. P. 26–31. doi: 10.25750/1995-4301-2008-4-026-31 (in Russian).
31. Drugov Yu.S., Belikov A.B., Dyakova G.A., Tulchinsky V.M. *Methods of analysis of air pollution.* Moskva: Chemistry, 1984. 384 p. (in Russian).
32. Kholstov V.I. Ways to solve the problem of safety of facilities for the destruction of chemical weapons // *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal.* 1995. V. 39. No. 4. P. 65–72 (in Russian).
33. Rastegaev O.Yu., Fedorenko E.V., Tolokonnikova T.P., Pankova R.M., Chupis V.N. Photometric determination of total phosphorus in environmental objects with preliminary oxidative mineralization // *Factory laboratory. Diagnostics of materials.* 2010. V. 76. No. 4. P. 8–12 (in Russian).
34. Maistrenko V.N., Khamitov R.Z., Budnikov G.K. *Ecological and analytical monitoring of supertoxicants.* Moskva: Khimiya, 1996. 317 p. (in Russian).
35. Fedorov A.A., Chernyakhovskaya F.V., Vernidub A.S., Ananyevskaya M.P., Zamaraev V.P. *Analytical chemistry of phosphorus.* Moskva: Nauka, 1974. 219 p. (in Russian).
36. Tikhomirova T.I., Krokhin O.V., Dubovik D.B., Ivanov A.V., Shpigun O.A. Chromatographic determination of silicon and phosphorus in the form of molybdenum heteropoly acids with preliminary concentration // *Journal of Analytical Chemistry.* 2002. V. 57. No. 1. P. 24–29 (in Russian).

## Обеспечение качества и безопасности процесса питьевой водоподготовки на примере р. Ганг

© 2024. А. Ю. Курбатов, к. т. н., доцент, Е. Д. Мурзина, к. т. н., доцент,  
М. А. Ветрова, аспирант, Н. А. Иванцова, к. х. н., доцент,  
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,  
125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9,  
e-mail: kurbatov.a.i@muctr.ru

Во всём мире остро стоит проблема качества питьевой воды. Несанкционированные сбросы загрязнённых сточных вод в жизнеобеспечивающие источники водных ресурсов делают последние непригодными для питья. Одним из примеров является р. Ганг – основная артерия хозяйственно-бытового назначения Индии с многочисленными производствами, расположенными на её берегах. Данная статья посвящена изучению возможности повышения качества питьевой воды р. Ганг (Индия), которая уже на входе в город химически и микробиологически загрязнена. Для максимального снижения химической нагрузки на р. Ганг предложен гидродинамический метод обработки воды с применением озона в малых дозах. В рамках работы подтверждена высокая эффективность совместной гидродинамической обработки воды и процесса озонирования. Установлено, что применение кавитационного гидродинамического устройства для обработки воды позволяет снизить расход озона в среднем на 20–25%, что оказывает влияние на положительный экономический эффект и конечную стоимость очищенной воды. Гидродинамическая очистка воды р. Ганг с добавлением в малых дозах озона позволяет получать воду питьевого качества без введения других химических реагентов, что, в свою очередь, делает данный метод экологичным и не несёт за собой вторичного загрязнения окружающей среды. Удешевление процесса очистки происходит из-за эффективного смешивания озона с очищаемой водой при помощи гидродинамического кавитационного устройства. За счёт увеличения площади контакта фаз и дополнительно возникающих кавитационных эффектов происходит интенсификация процесса очистки воды. Применение комбинированного метода гидродинамической обработки с применением озона позволяет значительно понизить цветность, удалить из системы большую часть взвешенных частиц, произвести окисление железа и никеля, снизить концентрацию СПАВ, нефтепродуктов и аммонийного азота; при двукратном количестве циклов очистки – полностью уничтожить бактерии. Нерастворимые соединения, полученные в процессе кавитационной гидродинамической обработки с применением озона, отводятся из системы керамическими мембранными фильтрами. Также в работе приведены результаты исследования химико-биологического исходного состава воды и воды после применения данной технологии с расчётом эффективности метода и стоимостной характеристики.

*Ключевые слова:* гидродинамическая обработка, озонлиз, микробиологическая загруженность, кавитация.

## Ensuring quality and safety for the process of drinkingwater treatment: case-study of the Ganges River

© 2024. A. Yu. Kurbatov ORCID: 0000-0003-2459-7289, E. D. Murzina ORCID: 0009-0007-2331-8467,  
M. A. Vetrova ORCID: 0000-0003-0165-6549, N. A. Ivantsova ORCID: 0000-0003-4117-072X,  
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
9, Miusskaya sq., Moscow, Russia, 125047,  
e-mail: kurbatov.a.i@muctr.ru

Drinking water quality is an acute problem all over the world. Unauthorized discharges of contaminated wastewater into life-sustaining water sources make the latter undrinkable. The Ganges River is the main artery of India's economic and domestic use with the numerous industries located on its banks. This paper is devoted to studying the possibility of improving the quality of drinking water in the Ganges River, India. The studied water is already chemically and microbiologically contaminated at the entrance to the city. The hydrodynamic method of water treatment using ozone in small doses is proposed to minimize the chemical load on the Ganges River. The study confirmed the high efficiency of combined hydrodynamic water treatment and the ozonation process. It is established that the application of cavitation hydrodynamic device for water treatment allows reducing ozone consumption on average by 20–25%, which affects the positive economic effect and the final cost of purified water. Hydrodynamic purification of the Ganges River water with the addition of ozone in small doses allows obtaining water of drinking quality without the introduction of other chemical reagents. The latter makes this method environmentally friendly and does not result in secondary environmental pol-

lution. The low cost of the purification process occurs due to the efficient mixing of ozone with the water being purified using a hydrodynamic cavitation device. By increasing the contact area of the phases and additionally arising cavitation effects, the water purification process is intensified. Application of the combined method of hydrodynamic treatment using ozone significantly reduces water color index, remove most of the suspended particles from the system, oxidize iron and nickel, and reduce the surfactant, petroleum products, and ammonia nitrogen concentrations; with twice the number of cleaning cycles – completely eliminate bacteria. Ceramic membrane filters remove insoluble compounds obtained during cavitation hydrodynamic treatment with ozone. The work also presents the results of studying the chemical and biological initial composition of water and water after using this technology with calculation of the effectiveness of the method and cost characteristics.

**Keywords:** hydrodynamic treatment, ozonolysis, microbiological load, cavitation.

Индия – страна с населением более 1,3 млрд человек, уступает по численности населения лишь Китаю. Одной из основных проблем данной территории является нехватка питьевой воды – всего 4% мировых водных запасов. Центральное место в жизни страны как культурного, так и хозяйственного назначения играют, несмотря на качество, воды р. Ганг, которая занимает первое место в системе пресного водоснабжения страны. На многих территориях страны р. Ганг является основным источником пресной воды [4].

Мощный поток р. Ганг протяжённостью 2700 км берёт своё начало в Гималаях и впадает в Бенгальский залив, снабжая водой почти 1/10 населения Земли.

В отдалённых регионах страны р. Ганг является единственным источником пресной питьевой воды. Местные жители используют речную воду, подвергая её простейшему фильтрованию и кипячению. По данным [2, 3] ежегодно от ненадлежащего качества воды 1,5–3,6 млн человек страдают от вирусной лихорадки, диареи, гельминтозов и др. Единственное, что спасает жителей Индии от тотальных эпидемий, это способность р. Ганг к самоочищению и обеззараживанию. По мнению учёных, повышенное содержание кислорода в воде, получаемое за счёт высокой турбулентности потоков, препятствует размножению бактерий, а ряд притоков реки, питающихся от горных источников, насыщают речную воду ионами серебра [4].

Вода реки не только утоляет жажду людей, но также питает скот и применяется для орошения земель, используется в качестве транспортной системы и основного энергоносителя страны (системы ГРЭС) [5]. Рост крупнейших мегаполисов по берегам р. Ганг отравляет реку, а также людей, которые зависят от неё. Многие крупнейшие кожевенные заводы Канпура – одного из основных промышленных центров Индии, через который протекает р. Ганг – не имеют систем эффективной переработки отходов, и стоки с тушами животных, сильней-

шими химикатами стекают в реку. Кроме того, в реку поступают поливочные воды с прилегающих сельскохозяйственных угодий, ввиду чего в воде реки обнаружены значительные концентрации пестицидов и других химикатов сельскохозяйственного назначения [6].

Острой проблемой р. Ганг является биологическое загрязнение, так как река используется в качестве канализационного коллектора. Каждую секунду в реку сливается порядка 1 млн л сточных вод, в неё поступают атмосферные стоки с улиц, а местные жители используют воду из реки для санитарных нужд [7]. Согласно данным лаборатории г. Варанаси, в водах реки находится от 40 до 80 тыс. КОЕ/мл фекальных бактерий при норме не более 50 КОЕ/мл [8].

Вопросам изучения качества воды р. Ганг посвящено множество работ [9–18]. В 1986 г. была разработана программа повышения качества пресной воды, но программа не дала удовлетворительных результатов [19].

Целью работы было изучение показателей качества воды р. Ганг, а также подбор минимальной, но в то же время достаточно эффективной, схемы водоочистки для нужд питьевого водоснабжения.

## Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были взяты образцы воды, отобранные из дельты р. Ганг вблизи г. Варанаси (штат Уттар-Прадеш), на входе в город (500 м выше крематория) и на выходе из города.

Химические, физические и биологические характеристики воды определяли по следующим методикам. Определение содержания ионов металлов проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с магнитной плазмой «Спектроскай» (Россия). Измерение содержания органических веществ выполняли на газовом хроматографе Кристалл 5001 (Россия). Содержание нитратов и аммония в воде определяли с использова-

нием ионоселективных электродов на лабораторном иономере И-160 (Россия). Перманганатную окисляемость (далее ПО) определяли методом титрования, содержание взвешенных веществ и минерализацию воды – гравиметрическим методом, содержание нефтепродуктов и СПАВ – методом ИК спектроскопии на портативном концентратометре КН-2М (Россия). Содержание фосфатов и цветность определяли на портативном спектрофотометре DR 2800 (HACH USA). Определение общего микробного числа проводили методом глубинного культивирования с использованием готового питательного агар-агара. Чашки инкубировали при температуре 36–37 °С в течение 24 ч, а также при 22 °С в течение 72 ч для фиксации сапрофитных водных микроорганизмов.

### Результаты и обсуждение

Результаты анализа химического состава воды, а также допустимые нормативы для данных показателей (по нормативам РФ) приведены в таблице 1.

Как видно из данных таблицы 1, вода на входе в город имеет превышение по установленным нормативам для таких показателей как ПО, содержание железа, взвешенных веществ, СПАВ, минерализация, цветность и содержание нефтепродуктов.

Основной проблемой объекта исследования (р. Ганг) является его высокая микробиологическая загрязнённость. Для определения общего микробного числа (ОМЧ) в образцах подсчитывали выросшие колонии на чашках Петри с питательным агар-агаром (рис. 1). Было отмечено, что в исследуемом объёме воды более 1000 КОЕ/мл, что превышает действующие нормативы РФ [20].

**Основные направления повышения качества воды.** Учитывая большие объёмы воды, для достижения эффективного результата очистки предполагается использовать воду на выходе из города, как наиболее чистый вариант, требующий минимальных затрат. Как следует из данных таблицы 1, основным направлением очистки воды станет её обеззараживание, в сочетании со снижением показателей загрязнённости органическими веществами (ПО, СПАВ, нефтепродукты).

В качестве основной технологической схемы для указанного выше состава природной воды была предложена технология, основанная на применении процесса озонирования совместно с процессом гидродинамической обработки.

Выбор в пользу озонирования был обусловлен как высокой окислительной способностью озона по отношению к ряду загрязняющих веществ органического происхождения, так и его высокой дезинфицирующей способностью [21–24]. Недостатком данного метода является недостаточная смешиваемость озона с обрабатываемой водой, а также проблемы синтеза в жарком климате с учётом нестабильности озона при высоких температурах [24, 25]. С целью минимизации количества потребляемого и вырабатываемого озона (снижение себестоимости и энергозатрат на охлаждение) за счёт более эффективного смешивания с обрабатываемой водой было предложено в качестве устройства для смешивания применить кавитационное гидродинамическое устройство [25]. Данное устройство использует энергию самого потока обрабатываемой воды для создания в ней кавитационных явлений, способствующих интенсификации массообменных процессов, диспергированию газов (как находящихся, так и поступающих) в обрабатываемой жидкости и обеззараживанию. Всё это приводит к увеличению степени окисления загрязняющих соединений за счёт образования активных форм кислорода [27–30].

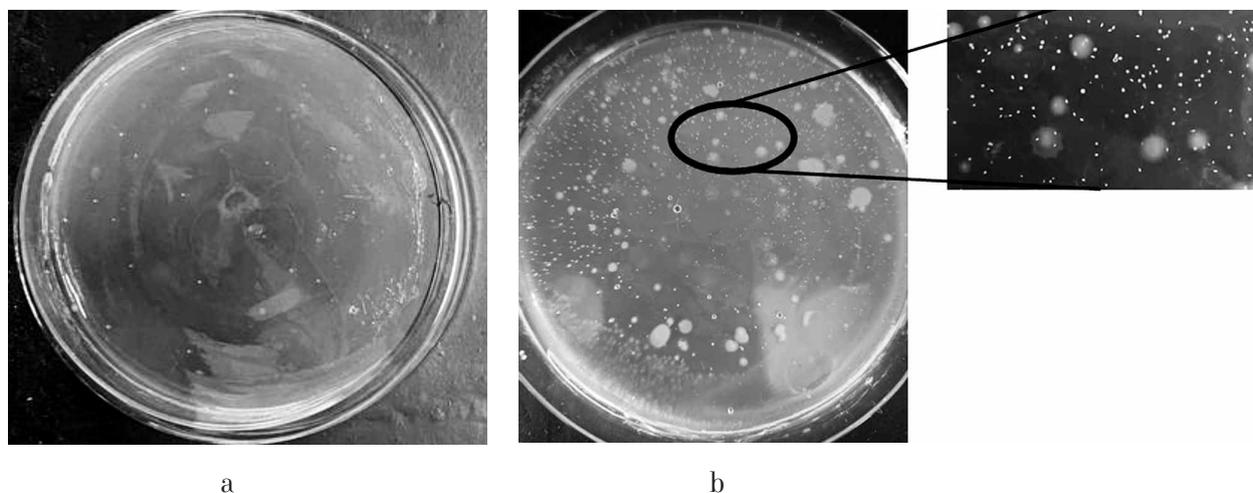
Создание необходимого градиента давления для достижения кавитационного эффекта в обрабатываемой воде достигается насосным оборудованием, представляющим собой либо высокорасходный низконапорный насос, либо малорасходный высоконапорный ( $Q > 3 \text{ м}^3/\text{час}$ ,  $P_{\text{н}} > 1,4 \text{ МПа}$ ). Важно отметить, что конструкция применяемого кавитационного гидродинамического устройства позволяет одновременно выполнять функцию эжектора озона без потери кавитационного явления (при определённом соотношении эжектируемого газа к объёму обрабатываемой воды). Реализация эжектирования озона в обрабатываемый поток воды осуществляется за счёт создания зоны разряжения по оси движения вихревого потока в кавитационном гидродинамическом устройстве. Это в свою очередь позволяет попадать озону непосредственно в зону образования кавитационных явлений, что приводит к резкому уменьшению диаметра диспергированных воздушных пузырьков озона, увеличивая тем самым площадь контакта фаз воздушных пузырьков с обрабатываемой водой. Время пребывания диспергированных пузырьков озона в объёме обрабатываемой воды увеличивается за счёт уменьшения скорости схлопывания пузырь-

Таблица 1 / Table 1

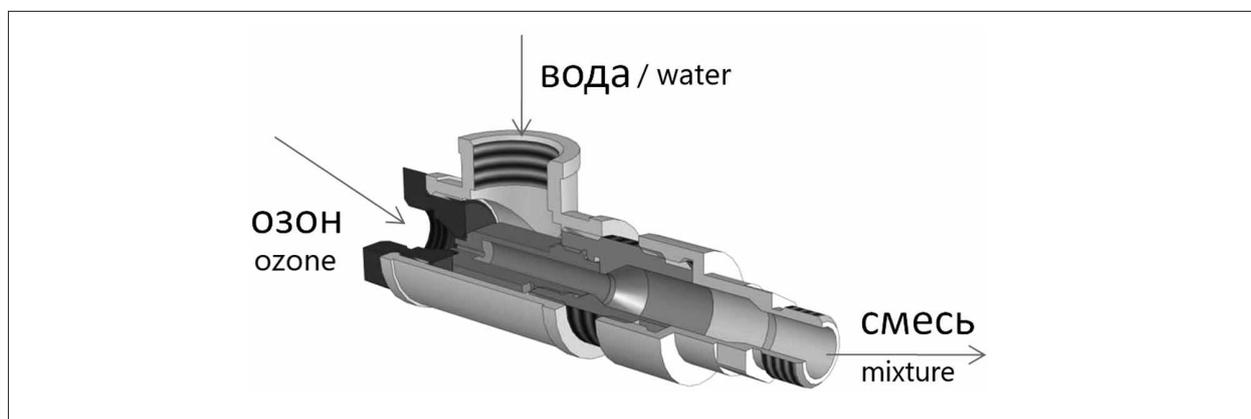
Показатели качества воды р. Ганг (поселение Варанаси)  
Water quality indicators of the Ganges River, Varanasi

Показатель Index	Единицы измерения Measurement units	На входе в город At the entrance to the city	На выходе из города On the way out of the city	Норматив Standard
рН	ед. / units	7,6±0,2	7,1±0,2	6,0–9,0*
Азот нитратов Nitrate nitrogen	мг/л mg/L	1,80±0,20	21,2±1,6	45 (по N / by N)**
Азот аммонийный Ammonia nitrogen		0,45±0,09	57±5	1,5 (по N / by N)**
Фосфор общий Total phosphorous		0,33±0,06	2,30±0,06	1,14 (по P / by P)**
Железо / Iron		0,049±0,011	0,24±0,05	0,3*
Цинк / Zinc		0,330±0,030	0,310±0,030	1,0*
Кобальт / Cobalt		0,0020±0,0001	0,0020±0,0001	0,1**
Кадмий / Cadmium		0,0010±0,00010	0,0010±0,00010	0,001**
Свинец / Lead		0,005±0,001	0,006±0,002	0,01**
Медь / Copper		0,0082±0,0020	0,0100±0,0020	1,0*
Хром / Chromium		0,0031±0,0020	0,0030±0,0020	0,05*
Магний / Magnesium		17,0±0,7	18,0±0,7	50**
Натрий / Sodium		35,0±0,9	50,0±0,9	200**
Калий / Potassium		9,0±0,8	14,0±0,7	не нормируется not standardized
Кальций / Calcium		31,0±1,2	35,0±1,5	не нормируется not standardized
Никель / Nickel		0,0066±0,0028	0,0061±0,0026	0,02**
Марганец / Manganese		0,0110±0,0035	0,0120±0,0038	0,1**
Минерализация Mineralization		1970±180	2250±220	1000*
Взвешенные вещества Suspended solids		19,1±0,9	125±6	3,5*
Нефтепродукты Petroleum products		0,180±0,020	0,250±0,020	0,1*
СПАВ / Synthetic surfactants	0,240±0,020	3,21±0,20	0,5*	
ПО / PD	мгО/л mgO/L	20,7±1,5	215,0±1,4	5 (по ПО / by PD)*
Жёсткость / Hardness	мг·экв/л mg·Eq/L	4,60±0,09	5,10±0,09	7*
Цветность / Color index	градусы degrees	26±2	42±3	20*
Общее микробное число Total microbial count	КОЕ/мл CFU/mL	> 1000	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	≤ 50

Примечание: \* норматив согласно СанПиН 2.1.4.1074-01; \*\* – СанПиН 1.2.3685-21.  
Note: \* standard according to SANPIN 2.1.4.1074-01; \*\* – SANPIN 1.2.3685-21.



**Рис. 1.** Колонии микроорганизмов, выросшие на 12 ч культивирования при температуре 37 °С на чашках Петри с агаризованной питательной средой: а) образец с чистой водой; б) образец с водой, взятой на входе в город  
**Fig. 1.** Colonies of microorganisms grown during 12 h of cultivation at 37 °С on Petri dishes with agar nutrient medium: a) clean water sample; b) at the entrance to the city



**Рис. 2.** 3D-модель кавитационного гидродинамического устройства  
**Fig. 2.** 3D model of a cavitation hydrodynamic device

ков, чему способствуют более мелкие размеры образовавшихся пузырьков.

Данное синергетическое применение кавитационной обработки и озонирования позволит, с одной стороны, минимизировать затраты озона на процесс окисления (за счёт увеличения площади контакта фаз вода-озон), а с другой – увеличит степень эффективности кавитационной обработки в отдельности (за счёт увеличенного окислительного эффекта). При этом оптимизируются общие аппаратурные затраты, так как использование указанного кавитационного гидродинамического устройства позволяет не только отказаться от сложного аппаратурного оформления, но и повысить эффективность очистки воды за счёт дополнительных кавитационных процессов, возникающих в процессе обработки воды, при минимальном количестве необходимого озона [26].

**Техническое обеспечение системы очистки.** Основные принципы работы кавитационного гидродинамического устройства были разработаны ещё в 80-х гг. в Институте машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) [30]. В рамках проведённых в РХТУ имени Д. И. Менделеева работ, была проведена модернизация прототипа с разработкой нового типа гидродинамических устройств.

Основной целью модификации устройства для решения данной технологической задачи являлось обеспечение возможности эжектирования озона непосредственно в рабочую камеру кавитационного гидродинамического устройства для достижения максимальной степени его диспергирования, но без потери возможности создания кавитационных явлений в обрабатываемой воде.

3D-модель разработанного кавитационного гидродинамического устройства представлена на рисунке 2.

Представленное на рисунке 2 устройство позволяет одновременно сочетать в себе процессы, вызванные явлением кавитации, эжектирования и диспергирования с функцией обеззараживания.

Данные по изменению расхода озона, необходимого для окисления органического загрязняющего вещества, на примере гуминовой кислоты (показатель цветности) при использовании гидродинамического устройства и без него, представлены на рисунке 3.

Из представленного на рисунке 3 графика видно, что применение гидродинамической обработки в сочетании с озонированием позволяет снизить эффективную дозу озона в среднем на 10–15%, либо на 10–15% повысить эффективность очистки при эквивалентных дозах.

В качестве заключительной стадии очистки воды предлагается использование системы фильтрации через керамический мембранный элемент с рейтингом фильтрации 0,072 мкм. Результаты химического анализа воды, прошедшей стадию озонирования, кавитации и фильтрации на керамическом мембранном фильтре, представлены в таблице 2.

Эффективность очистки воды с использованием предложенной технологии представлена на графике (рис. 4). Эффек-

тивная доза озона при совместной обработке в гидродинамическом устройстве составила 4,5 мг/л, при этом в отсутствии устройства эффективная доза озона составила 5,8 мг/л (на 20% выше).

Из данных таблицы 2 и рисунка 4 видно, что при использовании озона в дозе 4,5 мг/л происходит полное обеззараживание воды, при этом существенно снижается количество СПАВ и нефтепродуктов в воде, а также показатель ПО. Незначительное увеличение нитратов обусловлено частичным окислением соединений аммония в обрабатываемой воде активными формами кислорода.

Исходя из опубликованных данных на выработку 1 кг озона на классических трубчатых генераторах озона (конструкция Велсбаха) расходуется от 11 до 16 кВт/кг(O<sub>3</sub>) [23, 24]. Расчётная стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> воды с применением гидродинамического устройства составит 0,64 рубля против 0,72 рублей без него, или примерно 0,75 и 0,84 индийской рупии (при средней зарплате от 3000 рупий) соответственно. Принимая во внимание тот факт, что стоимость озонирующего оборудования ежегодно снижается, а на рынок выходят новые высокоэффективные генераторы озона (плоскостной), потребляющие 7–8 кВт/кг(O<sub>3</sub>), стоимость очистки 1 м<sup>3</sup> воды составит не более 0,25 руб. или 0,29 индийской рупии (0,21 при использовании гидродинамической обработки).

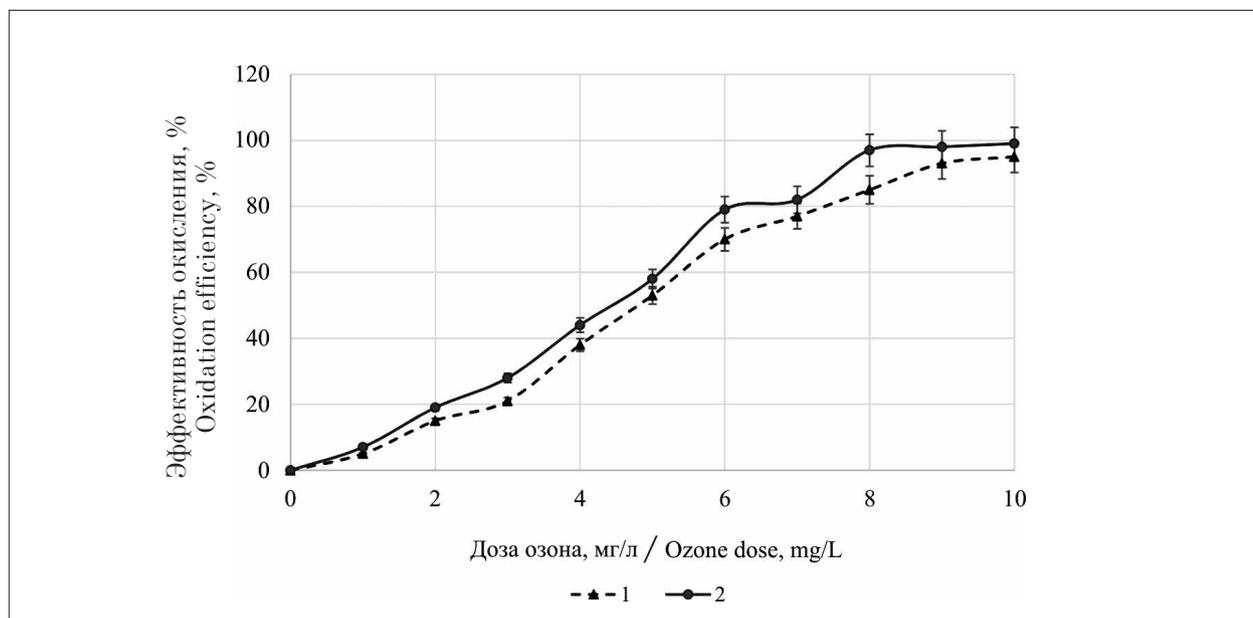


Рис. 3. Эффективность окисления (%) гуминовой кислоты при различной концентрации озона (мг/л) 1 – только озонирование; 2 – комбинация озонирования и гидродинамической обработки  
 Fig. 3. Efficiency (%) of humic acid oxidation at different ozone content (mg/L): 1 – ozonation only; 2 – combination of ozonation and hydrodynamic treatment

Таблица 2 / Table 2

Эффективность очистки воды с использованием озонирования и гидродинамической обработки  
Efficiency of water treatment using ozone and hydrodynamic treatment

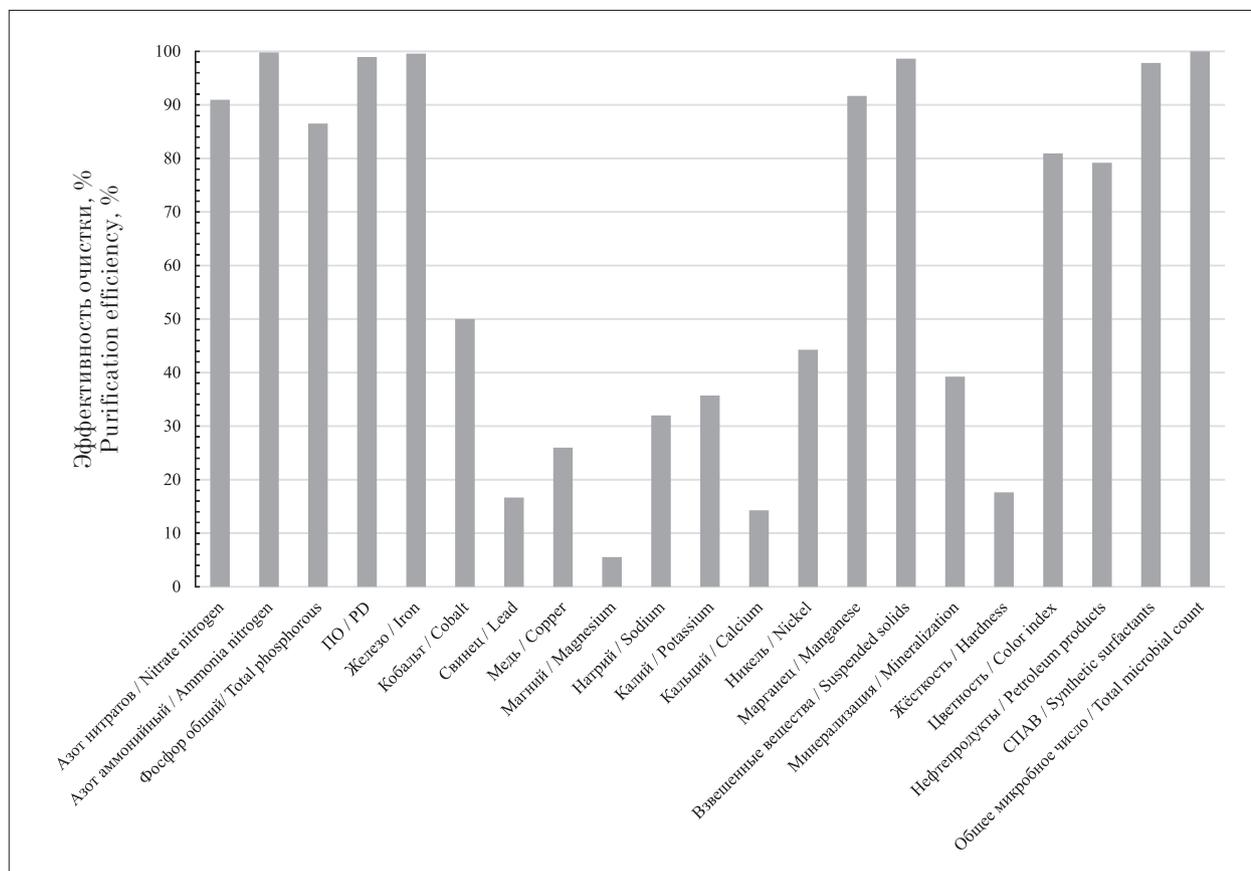
Показатель Index	Единицы измерения Measurement units	На входе в город At the entrance to the city	На выходе из города On the way out of the city	Норматив Standard
рН	ед. / units	7,1±0,2	6,5±0,2	6,0–9,0
Азот нитратов Nitrate nitrogen	мг/л mg/L	21,2±0,8	1,9±0,7	45 (по N / by N)
Азот аммонийный Ammonia nitrogen		56,8±2,3	0,12±0,02	1,5 (по N / by N)
Фосфор общий Total phosphorous		2,30±0,06	0,31±0,06	1,14 (по P / by P)
Железо / Iron		0,24±0,05	0,0100±0,0039	0,3
Цинк / Zinc		0,310±0,030	0,310±0,030	1,0
Кобальт / Cobalt		0,0020±0,0005	0,00100±0,00026	0,001
Кадмий / Cadmium		0,0010±0,0001	0,0020±0,0001	0,1
Свинец / Lead		0,0060±0,0020	0,0050±0,0020	0,01
Медь / Copper		0,0100±0,0020	0,0074±0,0020	1,0
Хром / Chromium		0,0030±0,0010	0,0030±0,0010	0,05
Магний / Magnesium		18,0±0,6	17,0±0,7	50
Натрий / Sodium		50,0±0,9	34,0±0,9	200
Калий / Potassium		14,0±0,8	9,0±0,8	не нормируется not standardized
Кальций / Calcium		35,0±1,9	30,0±1,7	не нормируется not standardized
Никель / Nickel		0,0061±0,0026	0,0034±0,0014	0,02
Марганец / Manganese		0,0120±0,0038	0,00100±0,00032	0,1
Взвешенные вещества Suspended solids	125±11	1,7±0,1	3,5	
Минерализация Mineralization	2250±200	1370±90	1000	
Нефтепродукты Petroleum products	0,250±0,020	0,0580±0,0020	0,1	
СПАВ / Synthetic surfactants	3,21±0,20	0,07±0,010	0,5	
ПО / PD	мгО/л mgO/L	215±14	2,3±0,4	5 (по ПО / by PD)
Жёсткость / Hardness	мг·экв/л mg·Eq/L	5,1±0,7	4,2±0,5	7
Цветность / Color index	градусы degrees	42±4	8±1	20
Общее микробное число Total microbial count	КОЕ/мл CFU/mL	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	не обнаружено not detected	≤ 50

**Заключение**

В рамках работы подтверждена высокая эффективность совместной гидродинамической обработки воды и процесса озонирования. Применение данного метода позволило увеличить степень очистки воды от аммонийного азота, ПО, никеля, СПАВ, нефтепродуктов на 70–90%,

железа – на 98%. Удалось снизить цветность воды на 69% за счёт глубокого и необратимого окисления гуминовых кислот и удалить порядка 71% нефтепродуктов. Количество взвешенных частиц в воде после очистки снижается на 91%.

Установлено, что применение гидродинамического устройства обработки воды позволяет снизить расход озона в среднем на



**Рис. 4.** Итоговая эффективность процесса очистки воды по предложенной технологии, %  
**Fig. 4.** The final efficiency of the water purification process according to the proposed technology, %

20–25%, что, несомненно, окажет положительный экономический эффект на стоимость очищенной воды.

Отмечено, что резкие изменения давления и температуры в местах схлопывания кавитационных пузырьков и воздействие озона на очищаемую воду приводят к полному уничтожению бактерий в очищаемой воде при двукратном количестве циклов очистки без добавления химических реагентов.

Применение данного метода очистки имеет ряд преимуществ, так как установка не требует больших площадей и может заменить несколько стадий водоподготовки (механические, физико-химические, биологические, обеззараживание).

С учётом полученных данных об эффективности совместного применения озонирования и гидродинамической обработки в процессах водоподготовки можно сделать вывод о том, что, несмотря на относительную дороговизну способа, при условии комплексного подхода (например, использовании мощностей соседней ГРЭС и ТЭС), возможно существенно повысить качество питьевой воды в штате Уттар-Прадеш, а также улучшить санитарно-гигиенические

показатели воды, используемой для хозяйственных и культурно-бытовых целей.

### References

- Goryacheva A.M. Urbanization and water supply of Indian cities // Water resources of India: economic, political, social aspects: materialy nauchnoy konferentsii. Moskva: Institute of Oriental Studies RAS, 2015. P. 77–116 (in Russian).
- Bidhuri S., Taqi M., Khan M.M.A. Water-borne disease: Link between human health and water use in the Mithepur and Jaitpur area of the NCT of Delhi // J. Public Health. 2018. V. 26. P. 119–126. doi: 10.1007/s10389-017-0835-y
- Kumar P., Srivastava S., Banerjee A., Banerjee S. Prevalence and predictors of water-borne diseases among elderly people in India: evidence from Longitudinal Ageing Study in India, 2017–18 // BMC Public Health. 2022. V. 22. No. 1. Article No. 993. doi: 10.1186/s12889-022-13376-6
- Nautiyal C.S. Self-purificatory Ganga water facilitates death of pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 // Curr. Microbiol. 2009. V. 58. No. 1. P. 25–29. doi: 10.1007/s00284-008-9260-3
- Revelle R., Lakshminarayana V. The Ganges water machine // Science. 1975. V. 188. No. 4188. P. 611–616. doi: 10.1126/science.188.4188.611

6. Samanta S. Metal and pesticide pollution scenario in Ganga River system // *Aquat. Ecosyst. Health Manage.* 2013. V. 16. No. 4. P. 454–464. doi: 10.1080/14634988.2013.858587
7. Singh A.N., Shrivastava R., Mohan D., Kumar P. Assessment of spatial and temporal variations in water quality dynamics of river Ganga in Varanasi // *Pollution.* 2017. V. 4. No. 2. P. 239–250. doi: 10.22059/poll.2017.240626.310
8. Kandhari R. Ganga reduced to sludge in Varanasi [Internet resource] <https://dialogue.earth/en/water/ganga-reduced-to-sludge-in-varanasi/> (Accessed: 12.02.2024).
9. Tripathi B.D., Sikandar M., Shukla S.C. Physico-chemical characterization of city sewage discharged into river Ganga at Varanasi, India // *Environ. Int.* 1991. V. 17. No. 5. P. 469–478. doi: 10.1016/0160-4120(91)90281-T
10. Khare R., Khare S., Kamboj M., Pandey J. Physico-chemical analysis of Ganga Water // *Asian J. Biochem. Pharm. Res.* 2011. V. 1. No. 2. P. 232–239.
11. Yadav R.C., Srivastava V.C. Physico-chemical properties of the water of river Ganga at Gazipur // *Indian J. Sci. Res.* 2011. V. 2. No. 4. P. 41–44.
12. Srivastava R.K., Sinha A.K., Pande D.P., Singh K.P., Chandra H. Water quality of the river Ganga at Phaphamau (Allahabad) – Effect of mass bathing during Mahakumbh // *Environ. Toxicol. Water Qual.* 1996. V. 11. No. 1. P. 1–5. doi: 10.1002/(SICI)1098-2256(1996)11:1<1::AID-TOX1>3.0.CO;2-D
13. Joshi D.M., Kumar A., Agrawal N. Studies on physicochemical parameters to assess the water quality of river Ganga for drinking purpose in Haridwar District // *Rasayan J. Chem.* 2009. V. 2. No. 1. P. 195–203.
14. Trivedi P., Bajpai A., Thareja S. Evaluation of water quality: physico-chemical characteristics of Ganga river at Kanpur by using correlation study // *Nature and Science.* 2009. V. 1. No. 6. P. 91–94.
15. Khatoon N., Khan A.H., Rehman M., Pathak V. Correlation study for the assessment of water quality and its parameters of Ganga river, Kanpur, Uttar Pradesh, India // *IOSR Journal of Applied Chemistry.* 2013. V. 5. No. 3. P. 80–90. doi: 10.9790/5736-0538090
16. Rai A.K., Paul B., Mudra L., Kishor N. Studies of selected water quality parameters of river Ganges at Patna, Bihar // *J. Adv. Lab. Res. Biol.* 2011. V. 2. No 4. P. 136–140.
17. Singh L., Choudhary S.K. Physico-chemical characteristics of river water of Ganga in Middle Ganga Plains // *IJRSET.* 2013. V. 2. No. 9. P. 4349–4357.
18. Arya S., Gupta R. Water quality evaluation of Ganga river from up to downstream area at Kanpur City // *Journal of Chemistry and Chemical Sciences.* 2013. V. 3 (2). P. 54–63.
19. Parshina L.S. The Clean Ganga project in India // *Modern approaches to the study of environmental problems in physical and socio-economic geography: materialy X Mezhdunarodnoy molodezhnoy shkoly-konferentsii.* Moskva: “11-y format”, 2017. P. 98–99 (in Russian).
20. Agarwal D.K., Gaur S.D., Sen P.C., Marwah S.M. Bacteriological study of Ganges water at Varanasi // *Indian J. Med. Res.* 1976. V. 64. No. 3. P. 373–383.
21. Cheremisinoff N.P., *Handbook of water and wastewater treatment technologies.* Butterworth-Heinemann, 2002. 636 p.
22. Spellman F.R. *Handbook of water and wastewater treatment plant operations.* CRC Press, 2013. 923 p. doi: 10.1201/b15579
23. Mazitova A.K., Sukhareva I.A. Aminova A.F., Yagafarova G.G., Khangildin R.I., Mukhametzhanova E.G. Oxidative method of wastewater treatment of woodworking industry enterprises // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 75–80 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-075-080
24. Orlov V.A. *Ozonation of water.* Moskva: Stroyizdat, 1984. 89 p. (in Russian).
25. Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Suslov A.S. Hydrodynamic cavitation as a method of intensifying the ozonation process in food technologies // *Bulletin of the Kazan Technological University.* 2012. V. 15. No. 8. P. 292–294 (in Russian).
26. Ganiev R.F. *Wave machines and technologies (Introduction to wave technology).* Moskva: R&C Dynamics, 2008. 192 p. (in Russian).
27. Tsitsifli S., Kanakoudis V. Disinfection impacts to drinking water safety – A review // *Proceedings.* 2018. V. 2. No. 11. Article No. 603. doi: 10.3390/proceedings2110603
28. Collivignarelli M., Abba A., Benigna I., Sorlini S., Torretta V. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants // *Sustainability.* 2018. V. 10. No. 2. Article 86. doi: 10.3390/su10010086
29. Roy P.K., Kumar D., Ghosh M., Majumder A. Disinfection of water by various techniques – comparison based on experimental investigations // *Desalination Water Treat.* 2016. V. 57. No. 58. P. 28141–28150. doi: 10.1080/19443994.2016.1183522
30. Sun X., Liu J., Ji L., Wang G., Zhao S., Yoon J.Y., Chen S. A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 737. Article No. 139606. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139606

**Мониторинг подземных и поверхностных вод в районе предприятий по утилизации опасных промышленных отходов**

© 2024. Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,  
 Е. В. Дабах<sup>2</sup>, к. б. н., с. н. с., Г. Я. Кантор<sup>1,2</sup>, к. т. н., с. н. с.,  
 А. С. Тимонов<sup>1,2</sup>, н. с., Е. А. Домнина<sup>1,2</sup>, к. б. н., с. н. с.,  
 Т. И. Кутявина<sup>1</sup>, к. б. н., с. н. с.,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра  
 Уральского отделения Российской академии наук,  
 167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
 e-mail: ecolab2@gmail.com

На территории создаваемого в Кировской области Экотехнопарка «Мирный» – производственно-технического комплекса по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности в рамках программы комплексного экологического мониторинга планируется проведение экологического мониторинга по всем природным средам и объектам. В данной работе представлены некоторые принципы и подходы к организации мониторинга подземных и поверхностных вод, донных отложений. Показано, что при организации мониторинга создаваемого объекта следует учитывать особенности системы мониторинга ранее существовавших на данной территории объектов и результаты многолетних наблюдений за состоянием природных вод в этом районе. В частности, при организации сети мониторинга рекомендуется использовать наблюдательные скважины, пробуренные для контроля объектов хранения и уничтожения химического оружия. При выборе показателей мониторинга необходимо учитывать повышенные концентрации загрязняющих веществ и показатели, свидетельствующие об ухудшении качества воды, выявленные при мониторинге существовавших объектов. Для формирования перечня приоритетности наблюдаемых параметров природных вод и водных объектов предложен логарифмический индекс токсичности загрязняющих веществ, основанный на классах токсичности и величинах предельно допустимых концентраций. Рекомендовано для оценки состояния природных вод и донных отложений использовать методы биоиндикации и биотестирования.

**Ключевые слова:** мониторинг поверхностных и подземных вод, утилизация и обезвреживание промышленных отходов, приоритетные загрязняющие вещества, сеть мониторинга, программа мониторинга.

**Monitoring of ground and surface water in the area of hazardous industrial waste disposal enterprises**

© 2024. T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047<sup>†</sup>

E. V. Dabakh<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-6088-4819<sup>†</sup>, G. Ya. Kantor<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-6462-6702<sup>†</sup>

A. S. Timonov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0001-8560-3051<sup>†</sup>, E. A. Domnina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-5063-8606<sup>†</sup>

T. I. Kutyavina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7957-0636<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch  
 of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
 e-mail: ecolab2@gmail.com

On the territory of the Mirny Ecotechnopark, a production and technical complex for processing, recycling and rendering harmless waste of I and II hazard classes, it is planned to conduct environmental monitoring of all natural environments and objects within the framework of the integrated environmental monitoring program. This paper presents some principles and approaches to organizing the monitoring of groundwater and surface water, bottom sediments. It is shown that when organizing the monitoring of the created object, it is necessary to take into account the features of the monitoring system of previously existing objects in this territory and the results of long-term observations of the

state of natural waters in this area. In particular, when organizing the monitoring network, it is recommended to use observation wells drilled to monitor chemical weapons storage and destruction facilities. When selecting monitoring indicators, it is necessary to take into account elevated concentrations of pollutants and indicators indicating deterioration in water quality identified during monitoring of existing objects. It is recommended to include 38 indicators in the list of environmental monitoring of the facility being created for groundwater, and 40 for surface water. To form a priority list of observed parameters of natural waters and water bodies, a logarithmic index of pollutant toxicity based on toxicity classes and maximum permissible concentration values is proposed. It is recommended to use bioindication and biotesting methods to assess the state of natural waters and bottom sediments, in particular, to conduct an analysis of the taxonomic composition of bottom invertebrates and quantitative indicators of benthic communities, as well as a qualitative assessment of the state of water bodies using bioindication indices.

**Keywords:** monitoring of surface and ground water, recycling and neutralization of industrial waste, priority pollutants, monitoring network, monitoring program.

Мониторинг подземных и поверхностных вод – один из эффективных методов контроля и прогнозирования состояния водных объектов, водоносных горизонтов в районах деятельности промышленных, горнорудных предприятий, предприятий сельскохозяйственного профиля, в местах размещения полигонов хранения бытовых и промышленных отходов. Актуальность мониторинга подземных и поверхностных вод обусловлена прогрессирующим загрязнением почв, поверхностных и подземных вод, увеличением нагрузки на окружающую среду (ОС).

Мониторинг подземных и поверхностных вод представляет собой комплексную систему наблюдений за изменением качественных и количественных показателей текущего состояния вод, сбора и обработки полученных данных для оценки изменения состояния водоёмов, подземных вод под воздействием антропогенных и естественных факторов.

Основные принципы организации системы мониторинга водных объектов представлены в работе [1]. Современные системы экологического мониторинга используют разнообразные методы химического анализа состава природных вод [2, 3], а также методы биоиндикации и биотестирования [4–6].

В четырёх регионах Российской Федерации (Курганская, Саратовская, Кировская области и Республика Удмуртия), где ранее размещались объекты хранения химического оружия, с 2002 по 2016 гг. были созданы производственные комплексы – объекты по уничтожению химического оружия (ОУХО), в настоящее время проводятся работы по их перепрофилированию в предприятия по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности [7]. На ОУХО была создана и активно действовала сеть государственного, производственного (объектового) и комплексного экологического мониторинга. Эти три системы экологического мониторинга не повторяли, а дополняли друг

друга данными о состоянии окружающей природной среды для получения объективных оценок о происходящих в ней изменениях. В частности, такая комплексная система экологического мониторинга действовала на ОУХО «Марадыковский» в пгт Мирный Оричевского района Кировской области и в зоне защитных мероприятий (ЗЗМ) вокруг объекта. На территории промплощадки, санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и ЗЗМ была спроектирована сеть экологического мониторинга, включающая наблюдательные скважины, водные посты, участки мониторинга лесных и луговых биоценозов, мониторинга почв, стационарные и мобильные посты контроля атмосферного воздуха.

Характеристика поверхностных водных объектов, данные о водоносных горизонтах и источниках их питания на территории планируемого размещения Экотехнопарка «Мирный», о составе поверхностных и подземных вод представлены в литературе [8–11].

Актуальность работы обусловлена тем, что в системе мониторинга ОС при перепрофилировании объекта должны учитываться как негативные последствия деятельности существовавшего ранее предприятия, так и новые источники и пути распространения загрязнения. Во многих странах Европы с высокой плотностью населения и развитой промышленностью в качестве фоновых принимаются показатели состояния ОС до начала ввода в эксплуатацию промышленных объектов [12].

Целью данной работы является разработка научных подходов к организации системы экологического мониторинга природных вод в рамках комплексного экологического мониторинга в районе создаваемых предприятий по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности для охраны вод от загрязнения и истощения, предотвращения негативных последствий влияния подземных и поверхностных вод на окружающую среду.

### Объекты и методы исследования

Исследуемая территория расположена в бассейне р. Вятки, русло которой проходит в 1 км к северу от производственно-технического комплекса (ПТК).

Объектом исследования являются подземные воды, пробы которых отбираются из наблюдательных скважин, расположенных в СЗЗ: 12н, 13н, 14н, 15н, 16н, 17н, а также из 5-х наблюдательных скважин, оборудованных на площадке ПТК (1н, 2н, 3н, 4н, 5н) (рис. 1, см. цв. вкладку III). При этом скважины 1н и 2н рассматриваются как фоновые для полигона и промплощадки соответственно.

К объектам исследования поверхностных вод следует отнести воду, донные отложения, гидробионтов, пробы которых отобраны в 3 искусственных водоёмах (пруды-копани), а также на р. Погиблице и р. Вятке в 500 м выше и ниже по течению устья впадающих водотоков.

Пробы воды отбирали согласно ГОСТ 59539-2021 (подземные воды) и ГОСТ Р 59024-2020 (поверхностные воды).

Анализ состояния поверхностных и подземных вод проводили по данным, полученным в ходе инженерно-экологических изысканий (ИЭИ) и по результатам исследований, выполненных в рамках оценки воздействия на ОС (ОВОС) – части проектной документации по созданию ПТК «Мирный» по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности [13, 14].

### Результаты и обсуждение

**Мониторинг подземных вод.** Воздействие объекта на геологическую среду может проявляться в загрязнении подземных вод при проливах в местах разгрузки, транспортировки, хранения и обезвреживания отходов. Загрязняющие вещества (ЗВ), поступающие в составе выбросов на поверхность почвы, фильтруются через её толщу и могут опосредованно воздействовать на подземные воды. Грунтовые воды в пойме залегают близко к поверхности, и поступление ЗВ в составе выбросов может привести к изменению таких динамических показателей как pH, содержание сульфатов, нитратов и других веществ.

Поступление ЗВ в эксплуатируемый водоносный горизонт маловероятно, он защищён от загрязнения.

Состав и свойства подземных вод зависят от геологического строения территории. На

рассматриваемой территории в геологическом строении осадочной толщи принимают участие четвертичные и верхнепермские отложения, к которым приурочены одноимённые водоносные комплексы. Практический интерес из них представляют четвертичный и юрпаловский.

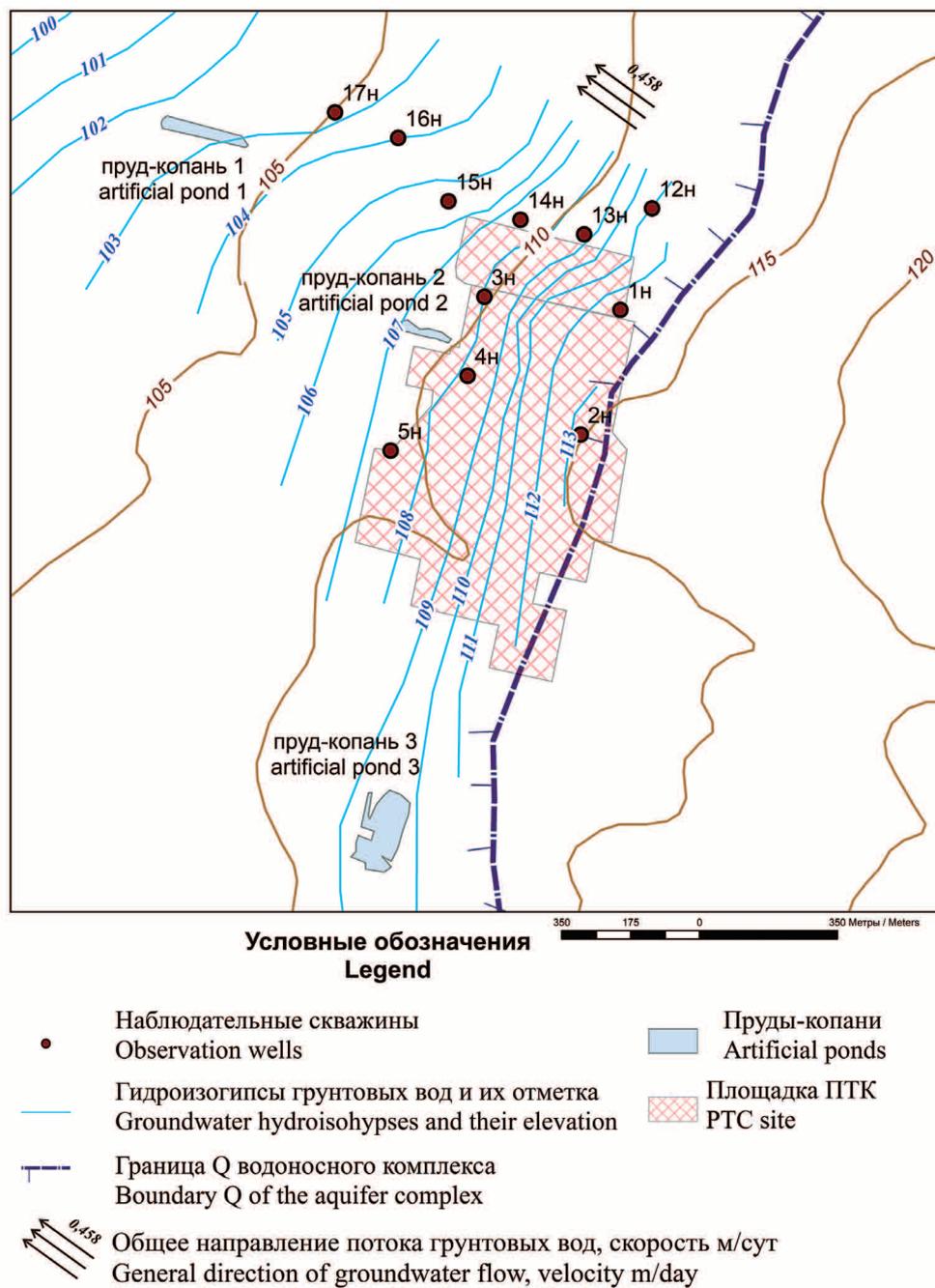
Юрпаловский водоносный комплекс является основным источником питьевого водоснабжения. Кровля эксплуатируемого водоносного комплекса в районе ПТК залегает на глубине 35 м, воды носят напорный характер. Эксплуатируемый водоносный горизонт относится к защищённым, подземные воды характеризуются как пресные, слабо щелочные, в них часто отмечаются повышенные концентрации бора и фтора, превышение норматива по pH.

Питание четвертичного водоносного ( $aQ_{II-IV}$ ) горизонта осуществляется за счёт инфильтрации атмосферных осадков, разгрузка происходит в ближайшую овражно-балочную и речную сеть, в искусственные водоёмы, но, возможно, и в подстилающие породы. Водообильность горизонта зависит от количества выпавших осадков. В верхней части потока расположена площадка ОУХО, промплощадка проектируемого ПТК «Мирный» (рис. 1).

Согласно ГОСТ Р 56060-2014, мониторинг за загрязнением грунтовых вод осуществляют путём отбора проб из контрольных колодцев, скважин или шурфов, заложенных по периметру объекта. Состав проб вод из контрольных шурфов, колодцев и скважин, заложенных выше объекта по течению грунтовых вод, характеризует их исходное состояние. Ниже объекта по течению грунтовых вод (на расстоянии 50–100 м, если нет опасности загрязнения грунтовых вод за счёт других источников) закладывают 1–2 колодца (шурфа, скважины) для отбора проб воды с целью выявления влияния на них стоков полигона. При более глубоком залегании грунтовых вод их контроль осуществляют с помощью наблюдательных скважин.

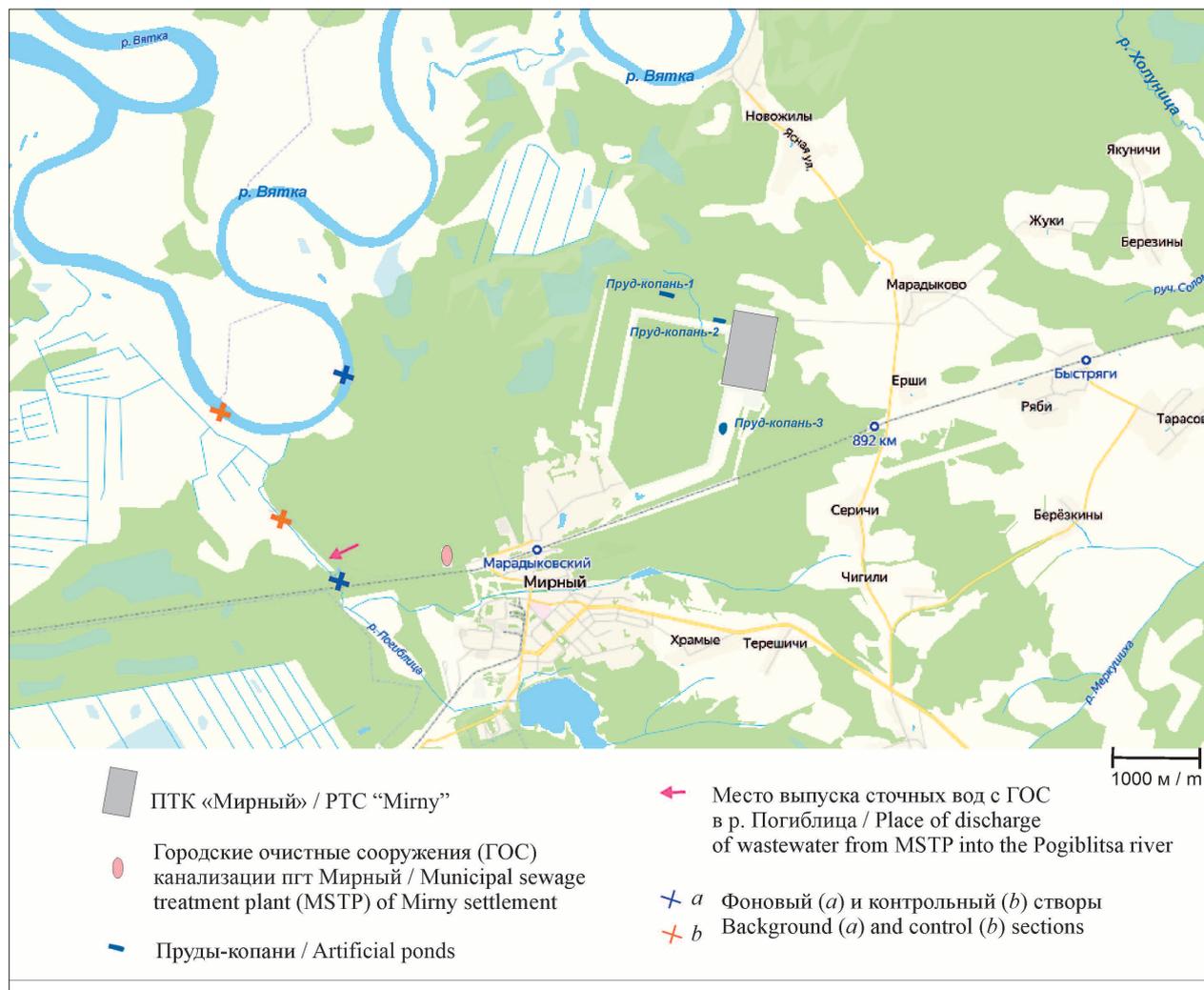
Сеть наблюдательных скважин на четвертичный водоносный горизонт ( $aQ_{II-IV}$ ) была сформирована под существовавшие в прошлом на данной территории объекты – ОУХО и полигон захоронения отходов, она достаточна для контроля промплощадки, а также позволяет оценить распространение возможного ореола загрязнения подземных вод по направлению потока. Исходя из состояния скважин, рекомендуется включить в сеть мониторинга ПТК 11 наблюдательных скважин, 5 из которых расположены по периметру объекта, 6 – по направлению движения потока (рис. 1).

**Т. Я. Ашихмина, Е. В. Дабах, Г. Я. Кантор,  
А. С. Тимонов, Е. А. Домнина, Т. И. Кутявина**  
**«Мониторинг подземных и поверхностных вод в районе предприятий  
по утилизации опасных промышленных отходов». С. 105.**



**Рис. 1.** Схема размещения скважин и водоёмов на исследуемой территории  
**Fig. 1.** Layout of wells and reservoirs in the study area

**Т. Я. Ашихмина, Е. В. Дабах, Г. Я. Кантор,  
А. С. Тимонов, Е. А. Домнина, Т. И. Кутявина**  
**«Мониторинг подземных и поверхностных вод в районе предприятий  
по утилизации опасных промышленных отходов». С. 105.**



**Рис. 3.** Сеть наблюдения за состоянием поверхностных вод в окрестностях ПТК «Мирный»  
**Fig. 3.** Surface water monitoring network in the vicinity of the PTC “Mirny”

По результатам обследования, проведённого в рамках ИЭИ [13], грунтовые воды в фоновой (контрольной) скважине 12н (рис. 1) характеризуются как пресные, нейтральные, с повышенным содержанием железа общего, низкими концентрациями сульфатов, хлоридов и фосфатов. Состав подземных вод в остальных наблюдательных скважинах принципиально не меняется, при этом отмечаются существенные колебания содержания железа общего – от 0,8 до 48 мг/дм<sup>3</sup>. Пространственной закономерности в распределении содержания железа общего не отмечается. В подземных водах также отмечается высокое содержание марганца. Выявлены существенные изменения водородного показателя: рН варьирует от слабокислых (5,3) до слабощелочных (8,9) значений. Основные колебания рН отмечаются в наблюдательных скважинах промзоны, что может косвенно указывать на влияние деятельности бывшего ОУХО на грунтовые воды. Кроме того, в них отмечено повышенное содержание фенолов. В пробе подземной воды, отобранной из скважины, расположенной вблизи промплощадки к северо-западу от неё, выявлены повышенные концентрации фторид-ионов.

Перечень контролируемых показателей составляется с учётом ЗВ, поступающих от источников загрязнения. В данном случае это могут быть загрязнённые сточные воды, воды атмосферных осадков, загрязнённые почвы и фильтрующие воду грунты. Согласно [15], участки загрязнения подземных вод выделяются по общим и специальным показателям качества воды. К общим показателям относятся: минерализация (М), общая жёсткость (Ж), окисляемость перманганатная (О), температура (t), величина рН, содержание хлоридов (Cl<sup>-</sup>), сульфатов (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), нитратов (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), фтора (F<sup>-</sup>), железа (Fe), марганца (Mn<sup>2+</sup>), меди (Cu<sup>2+</sup>), цинка (Zn<sup>2+</sup>), свинца (Pb<sup>2+</sup>), нефтепродуктов (НП). Специальные показатели включают набор определений, выполняемых при полном химическом анализе; содержание хлорорганических пестицидов, бенз[а]пирена, СПАВ, фенола, специфических веществ, характерных для конкретных объектов. В ГОСТ Р 56060-2014 указано, что в отобранных пробах грунтовых вод обычно определяют содержание аммиака, нитритов, нитратов, гидрокарбонатов, хлоридов, сульфатов, цианидов, кальция, железа, лития, магния, кадмия, хрома, свинца, ртути, мышьяка, меди, бария, органического углерода, сухого остатка, ХПК, БПК, рН и другие показатели

в соответствии с составом отходов. Программы мониторинга разрабатывают с учётом свойств размещаемых отходов. На территории ПТК хранение отходов запланировано на забетонированных площадках. Однако, при нарушении изоляции, а также в случае аварий возможно загрязнение грунтов и грунтовых вод.

Список общих показателей мониторинга подземных вод составлялся с учётом рекомендаций, изложенных в ГОСТ Р 56060-2014 и Методических рекомендациях ВСЕГИНГЕО [15], специальных – на основании перечня и состава отходов, представленного в ОВОС [14]. Многие показатели, относящиеся к общим, содержатся и в перечне характерных для объекта (специальных) веществ, например, медь, цинк, свинец, фториды, НП и другие.

В таблице 1 приведён перечень ЗВ, подлежащих мониторингу в подземной воде, упорядоченный по убыванию степени токсичности. Для ранжирования поллютантов мы предлагаем использовать индекс токсичности, зависящий от предельно допустимой концентрации (ПДК) вещества и его класса опасности:

$$I_n = 9 + \lg \frac{1}{k_h \cdot C_n}, \quad (1)$$

где  $I_n$  – индекс токсичности  $n$ -го поллютанта,  $k_h$  – коэффициент, зависящий от класса опасности  $h$ ,  $C_n$  – предельно допустимая концентрация  $n$ -го вещества (мг/дм<sup>3</sup>) в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 и Едиными санитарно-эпидемиологическими и гигиеническими требованиями к товарам, подлежащим санитарно-эпидемиологическому надзору (контролю), утверждёнными решением Комиссией Таможенного Союза от 28 мая 2010 года № 299 (в редакции, действующей с 27.02.2024). Значения коэффициентов  $k_h$  приняты следующие:  $k_1=1$ ;  $k_2=20$ ;  $k_3=600$ ;  $k_4=1200000$ .

Значения коэффициентов в формуле (1) предложены нами, исходя из следующих соображений:

- ведущим фактором ранжирования является класс опасности вещества, т. е. какое вещество  $h$ -го класса опасности не может иметь индекс токсичности ниже, чем любое из веществ  $h+1$ -го класса опасности;
- коэффициент  $k_1$  для 1-го класса опасности по определению равен 1;
- коэффициенты  $k_h$  для остальных классов опасности подбираются таким образом, чтобы последовательность значений индекса токсичности была монотонно убывающей;

Таблица 1 / Table 1

Перечень показателей мониторинга подземных вод / List of indicators for monitoring ground waters

№ п/п No.	Контролируемые вещества или параметры / Controlled substances or parameters	Класс опасности Hazard class	ПДК (мг/л) или норматив МАС (mg/L) or standard	Индекс токсичности Toxicity index $I_n$
1	Бенз[а]пирен / Benzo[a]pyrene	1	0,00001	14,00
2	Ртуть / Mercury	1	0,0005	12,30
3	Бензол / Benzene	1	0,001	12,00
4	Мышьяк / Arsenic	1	0,01	11,00
5	Кадмий / Cadmium	2	0,001	10,70
6	Фенол / Phenol	2	0,003	10,22
7	Пестициды (среднее по 4 веществам) / Pesticides (average of 4 substances)	2	0,008	9,80
8	Свинец / Lead	2	0,01	9,70
9	Никель / Nickel	2	0,02	9,40
10	Литий / Lithium	2	0,03	9,22
11	Серебро / Silver	2	0,05	9,00
12	Хром / Chromium	2	0,05	9,00
13	Цианиды / Cyanides	2	0,07	8,85
14	Кобальт / Cobalt	2	0,1	8,70
15	Бор / Boron	2	0,5	8,00
16	Фториды / Fluorides	2	1,5	7,52
17	Нитриты / Nitrites	2	3,0	7,22
18	Нефтепродукты / Petroleum products	3	0,1	7,22
19	Марганец / Manganese	3	0,1	7,22
20	Железо общее / Iron total	3	0,3	6,74
21	Медь / Copper	3	1,0	6,22
22	Олово / Tin	3	2,0	5,92
23	Фосфаты / Phosphates	3	3,5	5,68
24	Цинк / Zinc	3	5,0	5,52
25	Нитраты / Nitrates	3	45	4,57
26	Магний / Magnesium	3	50	4,52
27	Натрий / Sodium	3	200	3,92
28	СПАВ / Synthetic surfactants	4	0,1	3,92
29	Аммоний / Ammonium	4	1,5	2,74
30	Кальций / Calcium	4	180	0,67
31	Хлориды / Chlorides	4	350	0,38
32	Калий / Potassium	4	350	0,38
33	Сульфаты / Sulfates	4	500	0,22
34	Сухой остаток / Dry residue	–	1500	–
35	Гидрокарбонаты / Hydrocarbonates	–	400	–
36	рН	–	6-9	–
37	Окисляемость перманганатная Oxidizability of permanganate	–	7	–
38	Общая жёсткость / Overall rigidity	–	10	–

Примечание: прочерк означает отсутствие данных.  
Note: a dash indicates no data.

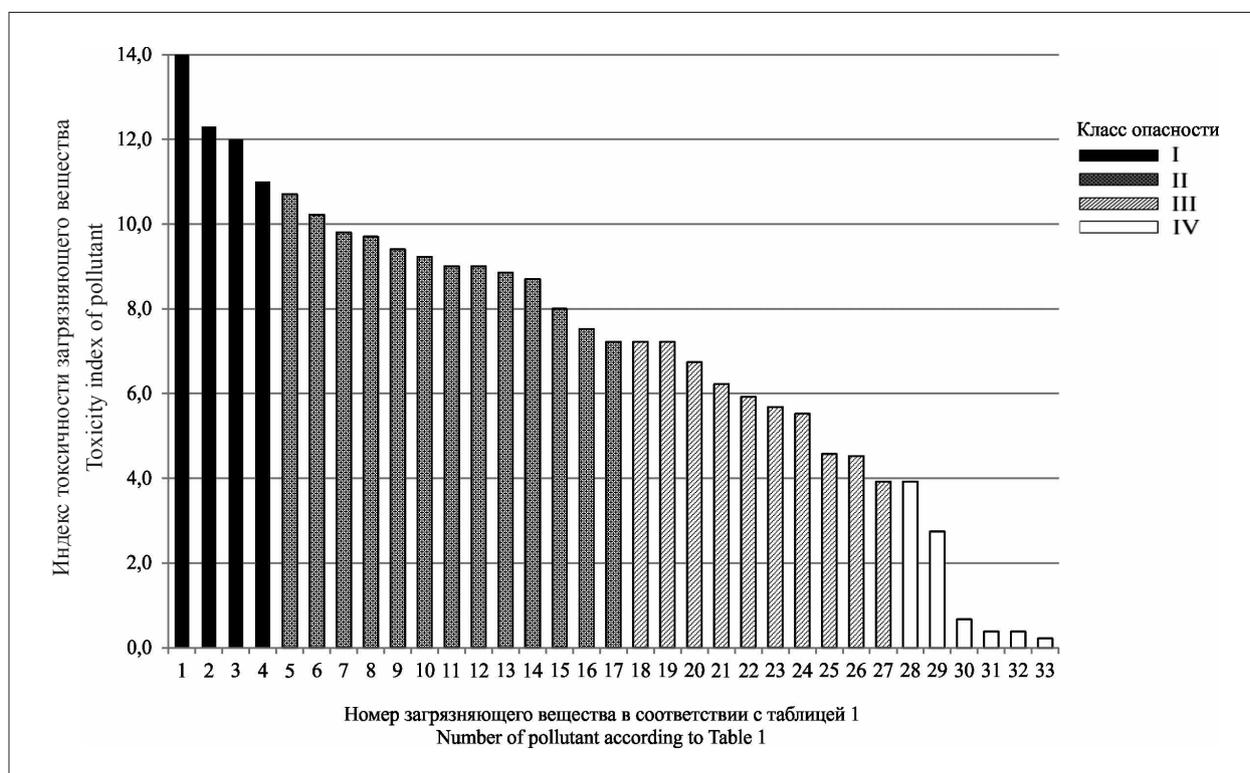


Рис. 2. Ранжирование загрязняющих веществ в подземных водах по убыванию индекса токсичности  
 Fig. 2. Ranking of pollutants in groundwater in descending order of toxicity index

– аддитивная константа 9 подобрана так, чтобы индекс токсичности наименее токсичного вещества был положительным.

В качестве ПДК пестицидов приведено среднее геометрическое по 4 наиболее распространённым сельскохозяйственным химикатам – ДДТ (0,1 мг/л), ГХЦГ (0,004 мг/л), 2,4-Д (0,0002 мг/л) и карбофос (0,05 мг/л).

Кроме того, в соответствии с ГОСТ Р 56060-2014 в перечень включены некоторые параметры, которые не являются поллютантами или токсикантами, но имеют важное значение для оценки качества воды (рН, окисляемость, жёсткость).

Соответствующая диаграмма приведена на рисунке 2. Она отражает убывание индекса токсичности ЗВ, перечисленных в таблице 1. На рисунке 2 выделяются 4 группы ЗВ и показателей, относящихся к разным классам опасности.

Периодичность отбора и анализа проб подземных вод – 3 раза в год в тёплое время. Согласно СП 47-13330-2016, возможность использования результатов ИЭИ по подземным и поверхностным водам на незастроенных и застроенных территориях ограничивается 3 и 2 годами соответственно. В связи с этим до начала функционирования ПТК в рамках фонового обследования природного комплекса

необходимо отобрать пробы и проанализировать их по всему перечню показателей, предлагаемых для мониторинга.

В процессе функционирования объекта при выявлении превышений нормативов по контролируемым показателям рекомендуемая частота анализа компонентов, не имеющих непосредственного отношения к составу перерабатываемых отходов, в зависимости от результатов последнего определения следующая:

- при >10 ПДК – еженедельно,
- при 1–10 ПДК – ежемесячно.

Перечень показателей мониторинга подземных и поверхностных вод и регламент контроля могут корректироваться в связи с изменением номенклатуры утилизируемых отходов и технологии их переработки.

**Мониторинг поверхностных вод.** Рассматриваемая территория расположена в бассейне р. Вятки, площадка ПТК «Мирный» находится за пределами водоохранной зоны р. Вятки и её притоков – рек Холуница и Погиблицы. Воды рек не используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Местами в непосредственной близости от промплощадки с северной стороны наблюдается заболоченность территории вокруг ПТК. Ближайшие водоёмы – пруды-копаны (№№ 1–3 на рисунке 1) – искусственного

происхождения, образованы вследствие выемки грунта при строительстве объекта хранения химического оружия и ОУХО, а также при строительстве полигона на обеих площадках. Их характеристика представлена в таблице 2.

Согласно результатам ИЭИ [13], вода в прудах по показателю рН является нейтральной. Содержание большинства определяемых компонентов во всех водоёмах очень низкое, на уровне предела обнаружения методик. Содержание органических веществ, оцениваемое по показателям БПК<sub>5</sub>, перманганатная окисляемость, ХПК выше в прудах № 2 и № 3 по сравнению с другими водоёмами. При том, что не выявлено превышений ПДК определяемых показателей, было отмечено, что вода в прудах очень отличается. Например, в пруду-накопителе на площадке № 1 можно отметить повышенное содержание хрома, марганца, кадмия и цинка. В накопителе 2 выявлено повышенное содержание никеля и хрома. Но почти во всех водоёмах в 2024 г. выявлено повышенное содержание органических веществ и низкое содержание растворённого кислорода в воде, что обусловлено погодными условиями летнего периода: высокими температурами и крайне малым количеством осадков. Дефицит кислорода в воде оказывает негативное

влияние на гидробионтов, способствует «заморным» явлениям в водоёмах.

Кроме данных водных объектов целесообразно проводить наблюдения в контролируемых и фоновых створах на р. Погиблице выше и ниже сброса стоков, а также на р. Вятке ниже и выше устья р. Погиблицы (рис. 3, см. цв. вкладку IV). Отбор поверхностных вод на территории СЗЗ (пруды-копани) рекомендуется проводить три раза в год, а в контролируемых и фоновых створах на р. Погиблице выше и ниже сброса стоков, а также на р. Вятке ниже и выше устья р. Погиблицы 2 раза в год (в весенний и летний периоды).

Перечень показателей мониторинга поверхностных вод несколько отличается от подземных вод, хотя его специфическая составляющая, учитывающая состав образующихся отходов, аналогична. При формировании перечня учитывались требования ГОСТ 56060-2014 и ГОСТ 58556-2019. Согласно ГОСТ 58556-2019, для оценки качества природных вод с экологических позиций используют комплексный показатель антропогенной нагрузки (ПАН), рассчитываемый по базовым анализам-маркерам, характеризующим типичные негативные воздействия (рН, сухой остаток, взвешенные вещества, ХПК, БПК, азот аммония, азот нитритов, азот нитратов,

Таблица 2 / Table 2  
Основные характеристики прудов в районе промплощадки ПТК «Мирный»  
Main characteristics of ponds in the area of the industrial site PTK "Mirny"

№ п/п No.	Название Name	Удалённость от ПТК, км Distance from PTC, km	Местоположение Location	Размеры водного объекта Dimensions of the water body
1	пруд-копань № 1 artificial pond No. 1	0,8	в лесу на просеке, к северо-западу от ПТК in the forest in a clearing, northwest of the PTK	длина 225 м; ширина 30 м; средняя глубина 1,2 м; площадь 6400 м <sup>2</sup> length 225 m; width 30 m; average depth 1.2 m; area 6400 m <sup>2</sup>
2	пруд-копань № 2 artificial pond No. 2	3,0	в жилом посёлке и частично рядом с шоссе-ной дорогой «ОУХО – пос. Мирный» in the residential settlement and partly next to the highway "OUHO – Mirny settlement"	длина 170 м; ширина 60 м; средняя глубина 1,2 м; площадь 10500 м <sup>2</sup> length 170 m; width 60 m; average depth 1.2 m; area 10500 m <sup>2</sup>
3	пруд-копань № 3 artificial pond No. 3	1,4	к югу от ОУХО; между восточной границей ОУХО и шоссе-ной дорогой «ОУХО – пос. Мирный» to the south of the OUHO; between the eastern border of the OUHO and the highway "OUHO – Mirny settlement"	длина 200 м; ширина 90 м; средняя глубина 0,8 м; площадь 17900 м <sup>2</sup> length 200 m; width 90 m; average depth 0.8 m; area 17900 m <sup>2</sup>

фосфор фосфатов, железо общее, марганец общий). Таким образом, к указанному в таблице 1 списку из 38 показателей добавляются ещё два: ХПК и БПК.

Важным направлением мониторинга природных вод является теоретическая интерпретация результатов наблюдений и прогнозирование дальнейшей динамики гидрологической и гидрогеологической ситуации с использованием соответствующих программных средств. Для математического моделирования движения подземных вод можно рекомендовать программу VisualModFlow канадской фирмы WaterlooHydrogeologic, а также отечественные АНСДИМАТ (Горный институт, Санкт-Петербург) или Логос Гидрогеология (Росатом). Расчёты течения и загрязнения поверхностных вод могут выполняться при помощи программ линейки MIKE Датского гидрологического института (DHI) или отечественного комплекса CARDINAL (ООО Кардинал Софт, г. Санкт-Петербург).

Кроме химических показателей контроля состояния поверхностных вод должен осуществляться и по биологическим показателям, прежде всего, как рекомендовано в ГОСТ 58556-2019, это острая токсичность.

В материалах ИЭИ [13] проектируемого объекта «Мирный» также представлены результаты биоиндикации. В частности, в составе макрозообентоса прудов установлено обитание представителей 71 таксона видового и надвидового рангов из 22 систематических групп; выявленные организмы относятся к восьми классам и пяти типам (Cnidaria, Nematelminthes, Annelida, Mollusca, Arthropoda).

Общая численность донных организмов в разных водоёмах изменялась от 5,2 до 16,1 тыс. экз./м<sup>2</sup>; общая биомасса – от 3,9 до 41,9 г/м<sup>2</sup>. Худшая экологическая ситуация зарегистрирована на пруду № 2, бентоценозы которого отличались невысоким таксономическим богатством, снижением биоразнообразия, наличием черт монодоминантности, выпадением представителей наиболее чувствительных к загрязнению групп. Эти оценки соответствовали результатам химического анализа.

Оптимальная периодичность наблюдений предполагает ежегодный двукратный отбор проб воды, донных отложений и макрозообентоса: весной (после окончания снеготаяния) и в конце лета – начале осени (в период наиболее активного функционирования донных сообществ).

Использование методов биоиндикации требует специальных знаний и предполагает

привлечение высококлассных специалистов – биологов. Однако эти методы позволяют объективно судить о благоприятности среды для существования живого и, по возможности, должны применяться для характеристики ОС в районе особо опасных объектов. Методы биоиндикации успешно зарекомендовали себя при проведении оценки качества воды в районе функционирования ОУХО [11, 16, 17].

**Донные отложения.** Необходимым элементом комплексной оценки антропогенного влияния на водные объекты является мониторинг донных отложений, способных накапливать ЗВ.

Отбор проб донных отложений проводится в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80. Пробы донных осадков отбираются в пунктах отбора проб поверхностных вод (рис. 3). Перечень определяемых в них показателей соответствует перечню показателей, рекомендуемых для определения в почвах [18], однако он может корректироваться в зависимости от содержания ЗВ в поверхностных водах. Критерием оценки загрязнённости донных отложений при отсутствии ПДК могут быть допустимые концентрации веществ в почвах по СанПиН 1.2.3685-21. Кроме того, о наличии загрязнения в реках можно судить по разности значений контролируемых показателей в пробах как воды, так и донных отложений, отобранных выше и ниже от устья притока.

### Заключение

На основании материалов проектной документации, материалов ОВОС и ИЭИ для создания производственно-технического комплекса по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности «Мирный», опираясь на данные многолетних мониторинговых исследований в районе бывшего объекта хранения и уничтожения химического оружия «Марадыковский», разработаны научные подходы к созданию системы экологического мониторинга подземных и поверхностных вод на территории создаваемого нового Экотехнопарка «Мирный».

Основными принципами создания сети мониторинга природных вод в окрестностях создающегося ПТК являются:

- использование существующей сети мониторинга ОУХО и хранения отходов его ликвидации;
- наличие наблюдательных скважин выше по потоку грунтовых вод источников за-

грязнения, непосредственно на промплощадке и ниже по потоку;

– возможность включения в сеть дополнительных скважин на промплощадке после утверждения генплана размещения всех источников воздействия.

Мониторинг подземных вод предложено проводить по результатам анализа проб, отобранных из 11 наблюдательных скважин, 5 из которых расположены по периметру объекта, 6 – по направлению движения потока подземных вод.

Мониторинг поверхностных вод рекомендуется проводить на водных объектах, расположенных непосредственно в СЗЗ объекта, и на ближайших водотоках. Это пруды-копани, р. Погиблица и р. Вятка.

Выбор контролируемых показателей мониторинга природных вод базируется на перечне веществ, участвующих в технологическом процессе и образующихся в результате утилизации отходов. Он должен также включать вещества, концентрации которых по данным ИЭИ или фонового обследования превышали ПДК либо фоновые значения. Кроме того, должны учитываться показатели, обязательные для определения в природных водах согласно нормативным документам. Для формирования перечня приоритетности наблюдаемых параметров природных вод и водных объектов предложен логарифмический индекс токсичности ЗВ, основанный на классах токсичности и величинах ПДК.

По подземным водам в данный перечень экологического мониторинга рекомендуется включить 38 показателей, по поверхностным водам – 40. Кроме химических показателей, контроль состояния поверхностных вод рекомендуется осуществлять и по биологическим показателям, проводить мониторинг донных отложений, а также в соответствии с требованиями ГОСТ 58556-2019 необходимо определять острую токсичность методами биотестирования.

Регламент проведения мониторинговых исследований для подземных и поверхностных вод имеет свои особенности. Отбор подземных вод из наблюдательных скважин рекомендуется проводить 3 раза в год (после пика весеннего паводка, в летний сезон и осеннюю межень) и выполнять полный химический анализ по рекомендованному перечню показателей. Отбор поверхностных вод на территории СЗЗ (пруды-копани) рекомендуется проводить также три раза в год, а в контролируемых и фоновых створах на р. Погиблице выше

и ниже сброса стоков, а также на р. Вятке ниже и выше устья р. Погиблицы 2 раза в год (в весенний и летний периоды). При выявлении превышений нормативов по контролируемым показателям рекомендуемая частота анализа компонентов, не имеющих непосредственного отношения к составу перерабатываемых отходов, в зависимости от результатов последнего определения должна быть следующей: при >10 ПДК еженедельно, от 1 до 10 ПДК – ежемесячно.

При внедрении новых технологий обезвреживания и утилизации отходов, а также в случае возникновения аварийных ситуаций перечень показателей мониторинга подземных и поверхностных вод и регламент контроля могут оперативно корректироваться.

Для характеристики качества воды в водоёмах рекомендуется использовать методы биоиндикации, в частности, проводить анализ таксономического состава донных беспозвоночных и количественных показателей бентосных сообществ, а также качественную оценку состояния водоёмов с применением биоиндикационных индексов.

Организация, осуществляющая экологический мониторинг подземных и поверхностных вод, должна располагать программными средствами моделирования и прогноза динамики распространения загрязнений.

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

## References

1. Barenboym G.M., Venitsianov E.V., Danilov-Danilyan V.I. Some scientific and technological problems of design, creation and operation of water bodies monitoring systems // *Voda: khimiya i ekologiya*. 2008. No. 1. P. 3–7 (in Russian).
2. Tazoe H. Water quality monitoring // *Analytical Sciences*. 2023. V. 39. P. 1–3. doi: 10.1007/s44211-022-00215-2
3. Zainurin S.N., Wan Ismail W.Z., Mahamud S.N.I., Ismail I., Jamaludin J., Ariffin K.N.Z., Wan Ahmad Kamil W.M. Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: a systematic review // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. V. 19. Article No. 14080. doi: 10.3390/ijerph192114080
4. Szczerbińska N., Gaczyńska M. Biological methods used to assess surface water quality // *Arch. Pol. Fish.* 2015. V. 23. P. 185–196. doi: 10.1515/aopf-2015-0021

5. Aracic S., Manna S., Petrovski S., Wiltshire J.L., Mann G., Franks A.E. Innovative biological approaches for monitoring and improving water quality // *Front. Microbiol.* 2015. V. 6. Article No. 826. doi: 10.3389/fmicb.2015.00826
6. Bioindicators and biotest systems in environmental assessment of man-made territories / Eds. T.Ya. Ashikhmina, N.M. Alalykina. Kirov: O-Kratkoe, 2008. 336 p. (in Russian).
7. Korolkov M.V., Mazhuga A.G. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation to create a new industry for industrial waste processing // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-006-012
8. Ashikhmina T.Ya. Comprehensive environmental monitoring of chemical weapons storage and destruction facilities. Kirov: Vyatka, 2002. 544 p. (in Russian).
9. Chupis V.N. The System of ecological monitoring of chemical weapons decommission plants. Experience of exploitation and the main directions of development // *Theoretical and Applied Ecology.* 2010. No. 1. P. 27–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2010-1-027-034
10. Ashikhmina T.Ya., Menyalin S.A., Mamayeva 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
11. Kochurova T.I. Zoobenthos in monitoring system of surface water objects within the safety measures zone in the CWDO “Maradykovsky” // *Theoretical and Applied Ecology.* 2008. No. 4. P. 47–53 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-4-047-53
12. Medvedev V.V., Laktionova T.N. Analysis of the experience of European countries in monitoring (review) // *Pochvovedenie.* 2012. No. 1. P. 106–114 (in Russian).
13. Project documentation “Industrial and technical complex for processing, recycling and rendering harmless waste of I and II hazard classes “Maradykovsky”. Moskva: Gosudarstvennaya korporatsiya po atomnoy energii “Rosavtom”, Aktsionernoe obshchestvo “Gosudarstvennyy spetsializirovannyi proektnyy institut”, 2020. 1360 p. (in Russian).
14. Industrial and technical complex for processing, recycling and rendering harmless waste of I and II hazard classes “Maradykovsky”. Environmental impact assessment. Saratov: OOO “NII tekhnologiy organicheskoy, neorganicheskoy khimii i biotekhnologiy”, 2020. 320 p. (in Russian).
15. Guidelines for the identification and assessment of groundwater pollution. Compilers: V.M. Goldberg, S.G. Melkanovitskaya, V.M. Lukyanchikov. Moskva: VSEGINGEO, 1988. 61 p. (in Russian).
16. Kochurova T.I., Kantor G.Y. Macrozoobenthos of middle course of the Vyatka River in the area of the chemical weapons destruction facility // *Inland Water Biology.* 2013. No. 4. P. 52–60 (in Russian). doi: 10.7868/S0320965213040104
17. Kochurova T.I. Zoobenthos in bioindication of lakes near a former chemical weapons destruction site // *Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XIX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem.* Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2021. P. 362–367 (in Russian).
18. Dabakh E.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya., Timonov A.S., Domnina E.A. Soil monitoring in the area of hazardous industrial waste disposal facilities // *Theoretical and Applied Ecology.* 2024. No. 1. P. 82–89 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-082-089

## Содержание биологически активных веществ в водных экстрактах продуктов деструкции кородревесных отходов

© 2024. Т. И. Ширшова, к. х. н., в. н. с., К. Г. Уфимцев, к. б. н., н. с.,  
И. В. Бешлей, к. б. н., н. с., А. Г. Донцов, к. х. н., с. н. с.,  
Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: shirshova@ib.komisc.ru

Проведено исследование химического состава продуктов деструкции кородревесных отходов (КДО) из отвала ОАО «Лесопромышленная компания «Сыктывкарский ЛДК». Содержание водорастворимых фракций в образцах из двух скважин составило от 0,1 до 1,1 % массы сухого вещества и зависело от глубины залегания. Эти отличия могут быть связаны с разным временем залегания, неоднородностью отходов, степенью их разложения и увлажнённости. При последовательной обработке сухого водорастворимого остатка растворителями с возрастающей полярностью были получены гексановый, эфирный и хлороформный экстракты, в которых методами тонкослойной (ТСХ) и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) подтверждено содержание дигидрокверцетина ( $t_R=28,6$  мин), ванилиновой ( $t_R=11,6$  мин) и *транс-п*-кумаровой ( $t_R=17,7$  мин) кислот, которые ранее были обнаружены в этилацетатных и гексановых экстрактах. При анализе образцов КДО на содержание полисахаридов и арабиногалактана в составе продуктов гидролиза водорастворимой гемицеллюлозы методом ВЭЖХ были обнаружены арабиноза, манноза, глюкоза и галактоза, что позволяет охарактеризовать выделенную фракцию, как смесь водорастворимых гемицеллюлоз – арабиногалактана и глюкоманнана. Показано, что независимо от глубины залегания и использования для экстракции воды или органических растворителей разной полярности во всех исследуемых образцах КДО обнаружены одинаковые компоненты – дигидрокверцетин, ванилиновая и *транс-п*-кумаровая кислоты.

**Ключевые слова:** кородревесные отходы, флавоноиды, кверцетин, дигидрокверцетин, фенолоксилоны, водорастворимые гемицеллюлозы, арабиногалактан, глюкоманнан.

## Content of biologically active substances in aqueous extracts of bark-wood waste degradation products

© 2024. T. I. Shirshova ORCID: 0000-0001-8938-612X, K. G. Ufimtsev ORCID: 0000-0002-8708-4213,  
I. V. Beshley ORCID: 0000-0002-9195-332X, A. G. Dontsov ORCID: 0000-0003-2559-5226,  
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: shirshova@ib.komisc.ru

The chemical composition of the destruction products of bark-wood waste (BWW) from the dump of JSC “Syktyvkar Timber Processing Company” was studied. The content of water-soluble fractions in samples from two wells ranged from 0.1 to 1.1% of the dry matter mass and depended on the depth of occurrence. These differences may be related to different time of occurrence, heterogeneity of waste, degree of decomposition and moisture content. Sequential treatment of the dry water-soluble residue with solvents of increasing polarity yielded hexane, ether and chloroform extracts. The content of dihydroquercetin ( $t_R=28.6$  min), vanillic acid ( $t_R=11.6$  min) and *trans-p*-coumaric acid ( $t_R=17.7$  min) were confirmed by TLC and HPLC methods. The above substances were previously detected in ethyl acetate and hexane extracts. Arabinose, mannose, glucose and galactose were detected when analyzing BWW samples for polysaccharide and arabinogalactan content in the hydrolysis products of water-soluble hemicellulose by HPLC. This allows us to characterize the isolated fraction as a mixture of water-soluble hemicelluloses – arabinogalactan and glucomannan. The same components – dihydroquercetin, vanillic and *trans-p*-coumaric acids – were found in all studied BWW samples regardless of the depth of occurrence and the use of water or organic solvents of different polarity for extraction. The detection of such strong antioxidants as dihydroquercetin, phenolic acids and arabinogalactan in BWW samples opens prospects for the development of substances based on them for medicine, animal husbandry and other sectors of national economy.

**Keywords:** bark-wood waste, flavonoids, quercetin, dihydroquercetin, phenolic acids, water-soluble hemicelluloses, arabinogalactan, glucomannan.

Перспективным направлением развития деревообработки в настоящее время является производство наукоёмкой продукции с высокой добавленной стоимостью на базе глубокой комплексной переработки лесных ресурсов. В связи с этим в последние годы наблюдается тенденция смещения акцентов с зелёной экономики на циркулярную экономику, основанную на повторном использовании ресурсов, основополагающими принципами которой является предотвращение образования отходов, повторное их использование и переработка [1–4]. Актуальность решения проблемы утилизации кородревесных отходов (КДО) длительного хранения требует применения высокотехнологичных методов их переработки. Комплексное исследование содержания биологически активных веществ и их компонентного состава, определение зависимости содержания от глубины залегания позволит разработать эффективные методы их выделения и использования в качестве субстанций для различных целей народного хозяйства [5–7].

Российская Федерация занимает второе место в мире по запасам и шестое – по переработке древесины [8]. Россия в настоящее время находится в процессе стимулирования переработки КДО для целей производства биоэнергии и биотоплива и увеличения переработки низкосортных отходов древесины и коры [9].

Проблема утилизации КДО длительного хранения остро стоит и в Республике Коми. В черте г. Сыктывкара почти 100 лет (с 1926 г.) существует короотвал Сыктывкарского лесопильно-деревообрабатывающего комбината (в настоящее время ООО «Сыктывкарский ЛДК»). По информации администрации МО ГО «Сыктывкар» основное количество отходов производства (кора, опилки, щепка, обрезки досок) было накоплено в период 1950–2010 гг. Предполагается, что в 1990–2000-е гг. на свалку вывозили и смёт с улиц города, содержащий песок, камни, бытовой мусор, листья, ветки и другие отходы [7]. Кородревесные отходы современных деревообрабатывающих, целлюлозно-бумажных производств состоят в основном из коры, опилок, кусков древесины разного размера [5, 7]. Химический состав коры существенно отличается от состава древесины соответствующей древесной породы, что обусловлено разным анатомическим строением коры различных видов деревьев. По сравнению с древесиной кора содержит гораздо меньше целлюлозы и значительно

больше экстрактивных и минеральных веществ [10, 11].

При изучении химического состава полифенольного комплекса некоторых видов пихты, ели и сосны было показано, что он является сложной смесью фенольных соединений, включающих флавоноиды, привлекающие интерес из-за широкого спектра биологической активности и их значимости как с экологической точки зрения, так и с перспективой использования их в качестве биологически активных препаратов [12–14]. Из биомассы лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и лиственницы даурской (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.), благодаря использованию комплексной безотходной технологии переработки, в своё время удалось выделить в чистом виде ряд новых природных биологически активных соединений, в том числе таких, как признанный эталоном антиоксидантной активности дигидрокверцетин (ДГК), доказать их структуру и выявить широкий спектр биологической активности [15–17].

Особое место среди природных полисахаридов занимает водорастворимый полисахарид арабиногалактан (АГ), значительное содержание которого в растительном сырье, особенно в коре и ядровой древесине хвойных, а также многообразие ценных качеств предполагает его использование в различных областях науки и народного хозяйства [18, 19]. Он может быть перспективен для синтеза широкого ряда биологически активных веществ. Обладая свойствами пребиотика, АГ может использоваться в качестве диетической добавки в пищевой промышленности и ветеринарии; высокая иммуностимулирующая активность позволяет использовать его в медицине, фармацевтической и косметической промышленности [18]. По результатам наших исследований [6], экстракты КДО содержат в своём составе ДГК. Известно, что в коре лиственницы совместно с ДГК содержится АГ. На их основе создан ряд комплексных препаратов (БАД Ардиксин, Араглин Д и др.), сочетающий уникальные свойства этих двух природных биологически активных веществ [15].

В последние годы, благодаря высокой растворимости в воде, уникально низкой вязкости растворов, низкой токсичности и другим ценным свойствам, исследования биологической активности АГ активизировались. Установлено, что этот полисахарид проявляет иммуномодулирующие, митогенные, антимуtagenные, гастропротекторные

и антимикробные, а также пребиотические свойства. Эти свойства в сочетании с высокой мембранотропностью и диспергирующей способностью открывают широкие перспективы использования АГ в медицине, ветеринарии, пищевой и косметической промышленности. Наличие этих двух компонентов – ДГК и АГ, с высокой антиоксидантной активностью, в составе КДО позволит использовать их для получения субстанций, стимулирующих прорастание семян, рост растений, в качестве компонентов органических удобрений и других полезных препаратов [20, 21].

Целью наших исследований является комплексное изучение содержания водорастворимых фракций биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов длительного срока хранения, представляющих интерес как сырьё для получения субстанций различного народнохозяйственного значения.

### Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали образцы КДО из короотвала ОАО «Лесопромышленной компании «Сыктывкарский ЛДК». Отбор образцов по градиенту высоты полигона проводили методом бурения двух скважин, представляющих выработки круглого сечения, вертикально пробуренные с поверхности отвала на глубину 20 м (скважина 1) и 27 м (скважина 2). Высота отвала в месте нахождения скважины 2 была на 7 м выше по сравнению со скважиной 1. Однако нижние слои обеих скважин находились на одинаковом уровне относительно поверхности земли. Верхний слой полигона в районе скважины 2 содержал менее разложившиеся отходы. Было отобрано по 9 проб из скважин 1 и 2. Отбор проб по глубине залегания связан с разным возрастом их нахождения в отвале КДО. Образцы, измельчённые до 100–1000 мкм, подвергали предварительной экстракции этилацетатом [2]. Сухую массу КДО заливали водой в соотношении 1:8, нагревали до 95 °С и выдерживали при этой температуре в течение двух часов. Горячую смесь фильтровали через складчатый фильтр, водный экстракт упаривали до ¼ объёма, охлаждали и выливали при перемешивании в этиловый спирт в соотношении экстракт:спирт 1:4. С образовавшегося при стоянии на холоде осадка сливали надосадочную жидкость, осадок промывали спиртом и сушили в вакууме. Массу вещества определяли гравиметрическим

методом. Брали по шесть образцов из обеих скважин, отобранных на разной глубине.

Сухой осадок массой 0,7 г растворяли в воде и экстрагировали несмешивающимися с водой растворителями с возрастающей полярностью: гексан→диэтиловый эфир→хлороформ. Полученные бесцветные растворы фильтровали через безводный сульфат натрия, упаривали в вакууме досуха и определяли массу сухих остатков гравиметрическим методом.

Тонкослойную хроматографию проводили на пластинах DC-Fertigfolien Alugram® Xtra SIL G/UV<sub>254</sub> размером 20×20 см (Germany) в системе растворителей этилацетат:толуол:муравьиная кислота:вода 30:10:5:1. Проявитель – 10% раствор фосфорномолибденовой кислоты (ФМК) в 95% этиловом спирте. В качестве растворов сравнения использовали стандартные образцы кверцетина, дигидрокверцетина, галловой, феруловой, ванилиновой, протокатеховой, *n*-кумаровой и кофейной кислот.

Высокоэффективную жидкостную хроматографию осуществляли в изократическом режиме на хроматографе Smartline (Knauer, Германия), снабжённом аналитической колонкой Kromasil 100-5C 18, 4×250 мм, петлёй дозирования 20 мкл и детектором Smartline 2600 на диодной матрице. Колонку термостатировали при 25 °С. Детекцию проводили при длине волны 254 нм. В качестве подвижной фазы использовали смесь вода:ацетонитрил:фосфорная кислота с соотношением компонентов 85:15:0,05. Скорость элюирования – 0,7 мл/мин. Образцы перед анализом очищали методом твёрдофазной экстракции на патронах ДИАПАК С16. В качестве стандартов использовали дигидрокверцетин, ванилиновую (Fluka), *транс*-*n*-кумаровую (Alfa Aesar), протокатеховую (Alfa Aesar) кислоты.

Для анализа содержания полисахаридов и присутствия арабиногалактана навески КДО (20–25 г) экстрагировали 300 мл дистиллированной воды при комнатной температуре в течение двух часов. Экстракты фильтровали и вместе с промывными водами упаривали до объёма 100 мл. Тонкую взвесь удаляли фильтрованием через ацетат-целлюлозную мембрану с диаметром пор 1,0 мкм. Остаток песка на дне стакана высушивали и взвешивали для внесения поправки к величине навески КДО. Водорастворимые гемицеллюлозы (ВГМЦ) осаждали добавлением к экстракту 1,5-кратного объёма ацетона. Осадок ВГМЦ отфильтровывали через фильтр Шотта с пористостью 16 (S4), промывали ацетоном,

высушивали на воздухе при небольшом нагревании и взвешивали.

Для проведения кислотного гидролиза к осадку ВГМЦ непосредственно на фильтре Шотта добавляли 3 мл 72% раствора серной кислоты и выдерживали смесь в течение 1 ч при комнатной температуре при периодическом перемешивании, после чего смывали продукты предварительного гидролиза 40 мл воды в коническую колбу. Полученный раствор выдерживали в течение 1 ч в автоклаве при температуре 130 °С и давлении 2,0 атм для предотвращения вскипания реакционной смеси. После охлаждения объём гидролизата ВГМЦ доводили до 50 мл.

Перед анализом продуктов гидролиза методом ВЭЖХ к гидролизату добавляли порошок карбоната бария для удаления серной кислоты до прекращения выделения пузырьков углекислого газа и установления нейтрального значения рН суспензии. Образовавшийся сульфат бария отфильтровывали, фильтрат и промывную воду упаривали досуха. Сухой остаток растворяли в 5 мл 60%-ной смеси ацетонитрила с водой.

Анализ продуктов гидролиза ВГМЦ методом ВЭЖХ проводили на хроматографе Кнауер с рефрактометрическим детектором, используя колонку 250×4 мм Диасорб Амин, 5 мкм (БиоХимМак, Россия), термостат колонки при 30 °С, подвижную фазу ацетонитрил:вода 80:20 об. % при скорости потока 1,0 мл/мин.

### Результаты и обсуждение

Проведённые нами ранее исследования [6] содержания биологически активных соединений в образцах КДО, взятых на различной глубине залегания, показали, что при экстракции органическими растворителями разной полярности (гексан, диэтиловый эфир, хлороформ, этилацетат) компонентный состав фенольных фракций остаётся постоянным, включая такие важные антиоксиданты, как дигидрокверцетин и фенолоксиолы (рис.). Анализ методами ТСХ и ВЭЖХ показал, что они содержат шесть соединений фенольной природы, из которых четыре по хроматографическим и спектральным характеристикам идентифицированы как протокатеховая, ванилиновая, *транс-п*-кумаровая кислота и её *цис*-изомер.

Согласно данным авторов [10, 22–24], полученным в результате многолетних исследований, естественное биологическое разложение лигноцеллюлозных отходов в ре-

альных условиях происходит медленно. Даже после более чем 80-летнего хранения полной гумификации древесины в теле отвала коры не происходит, древесная щепа и частицы коры полностью сохранили свою структуру в образцах 75–82 года хранения.

С помощью водной экстракции из КДО были извлечены водорастворимые фракции, содержащие, в том числе, различные полисахариды (табл. 1).

Как видно из таблицы 1, в содержании водорастворимых фракций продуктов КДО в скважинах 1 и 2 наблюдается некоторое различие, что связано с неоднородностью отходов, степенью их разложения, увлажнённости и с различным временем залегания.

При последовательной обработке сухого водорастворимого осадка растворителями с возрастающей полярностью были получены гексановый, эфирный и хлороформенный экстракты, содержание сухих веществ в которых приведено в таблице 2.

Анализ ТСХ полученных экстрактов показал, что во всех образцах имеется вещество, отвечающее по коэффициенту подвижности ванилиновой кислоте ( $R_f=0,6$ ), в эфирном и хлороформенном экстракте содержится вещество, совпадающее по коэффициенту подвижности с дигидрокверцетином ( $R_f=0,53$ ). Методом ВЭЖХ подтверждено содержание в хлороформенном экстракте дигидрокверцетина ( $t_R=28,6$  мин), ванилиновой ( $t_R=11,6$  мин) и *транс-п*-кумаровой ( $t_R=17,7$  мин) кислот.

Для анализа содержания и компонентного состава водорастворимых веществ в КДО была проведена водная экстракция образцов, отобранных на разной глубине залегания в скважинах 1 и 2 (табл. 3). Закономерностей в изменении содержания водорастворимых веществ, распределении их по глубине залегания, так же как и в случае содержания органических соединений фенольной природы, растворимых в органических растворителях разной полярности, не наблюдается. Причины такого неравномерного распределения, как уже указывалось, связаны с неоднородностью залегающих отходов, степенью их разложения и увлажнённости, с различным временем залегания и целым рядом других причин.

При анализе образцов КДО на содержание полисахаридов и арабиногалактана полученная водной экстракцией водорастворимая гемицеллюлоза была подвергнута кислотному гидролизу. В составе продуктов гидролиза методом ВЭЖХ были обнаружены арабиноза,

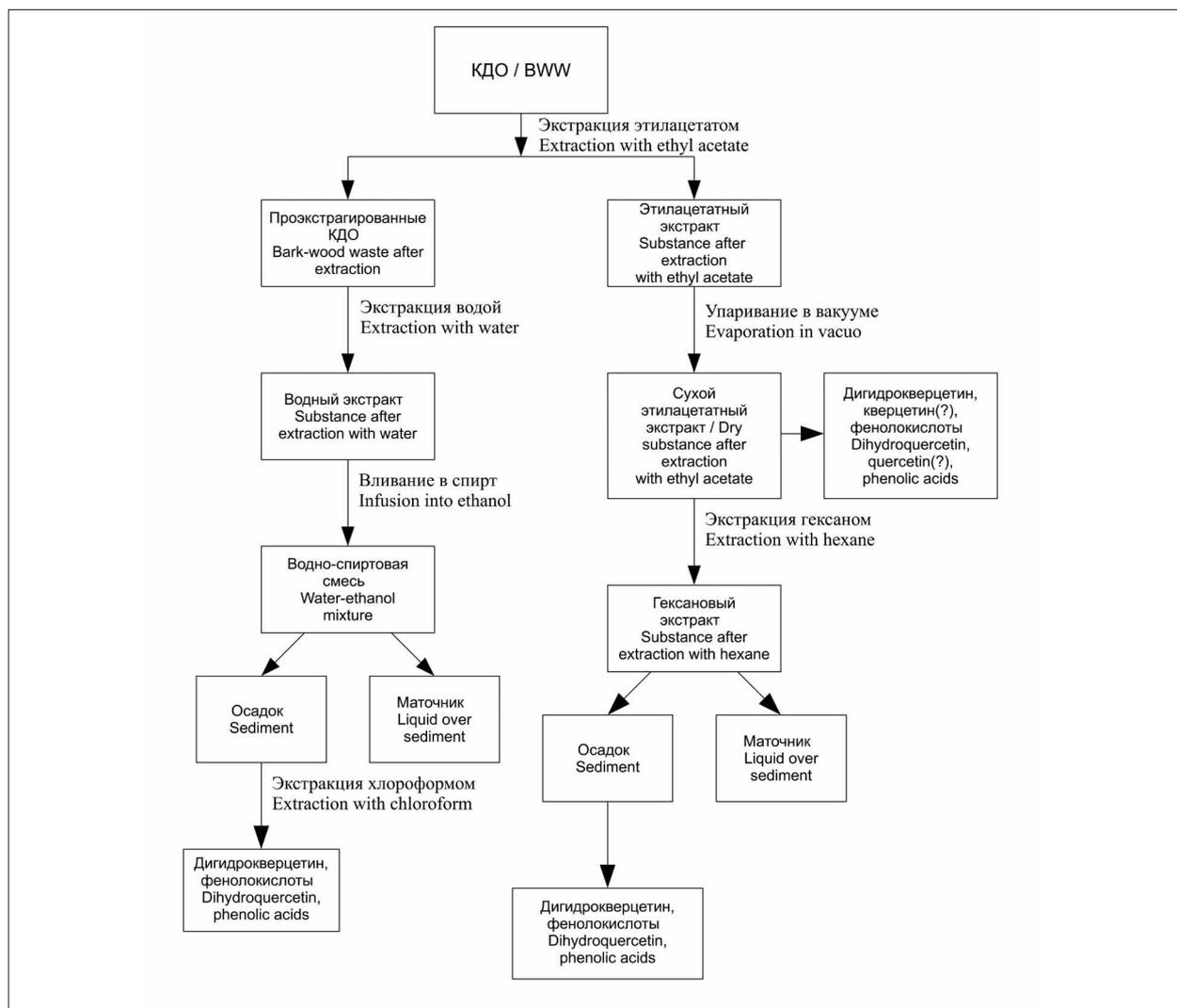


Рис. Схема выделения биологически активных веществ из кородревесных отходов экстракцией растворителями разной полярности.

Примечание: ? – присутствие соединения требует дополнительного подтверждения.

Fig. Isolation of biologically active substances from bark-wood waste by extraction with solvents of different polarity (scheme).

Note: ? – the presence of the compound requires additional confirmation

манноза, глюкоза и галактоза, что позволяет охарактеризовать выделенную фракцию ВГМЦ как смесь водорастворимых гемицеллюлоз – арабиногалактана и глюкоманнана.

### Заключение

Проведено исследование биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов, взятых на разной глубине короотвала ОАО «Сыктывкарский ЛДК», расположенного в микрорайоне Лесозавод г. Сыктывкара.

Установлено, что в содержании водорастворимых фракций в продуктах КДО из двух скважин наблюдается некоторое различие, что связано с неоднородностью отходов, сте-

пенью их разложения, увлажнённости и с различным временем залегания. Содержание водорастворимых фракций, полученных из шести образцов, взятых на глубине 1–8 м из скважины 1, составляет 0,2–0,6% массы сухого вещества. В верхних слоях, взятых из скважины 2, содержание водорастворимых фракций значительно ниже (0,1%). Начиная с 15 м, содержание водорастворимых фракций возрастает до 1,1 % от массы сухого вещества.

При последовательной обработке сухого водорастворимого остатка растворителями с возрастающей полярностью были получены гексановый, эфирный и хлороформный экстракты с различным содержанием органических соединений. Анализ ТСХ полученных

Таблица 1 / Table 1

Содержание водорастворимых фракций в образцах кородревесных отходов на различной глубине залегания / The content of water-soluble fractions in bark-wood waste samples at different depths of occurrence

Скважина 1 / Borehole 1		Скважина 2 / Borehole 2	
Глубина залегания образца, м Sample depth, m	Содержание водорастворимой фракции, % сухого вещества The content of the water-soluble fraction, % of dry substance	Глубина залегания образца, м Sample depth, m	Содержание водорастворимой фракции, % сухого вещества The content of the water-soluble fraction, % of dry substance
1–2	0,4	0–1,5	0,1
2–3	0,2	1,5–3	0,1
3–4	0,2	3–4	0,1
4–5	0,3	6–7,5	1,0
5–6	0,6	15–18	1,1
7–8	0,5	21–24	1,1

Таблица 2 / Table 2

Характеристики веществ, полученных при экстракции сухого водорастворимого осадка растворителями разной полярности / Characteristics of substances obtained by extraction of dry water-soluble sediment with solvents of different polarity

Экстрагент Extractant	Масса вещества, % Substance mass, %	Коэффициент подвижности, $R_f^*$ Retardation factor, $R_f^*$
Гексан / Hexane	1,9	0,77; <b>0,6</b> ; 0,48
Диэтиловый эфир / Diethyl ether	5,8	0,8; 0,73; <b>0,6</b> ; <b>0,53</b>
Хлороформ / Chloroform	4,9	0,8; 0,73; <b>0,6</b> ; <b>0,53</b> ; 0,48

Примечание: \* – коэффициент подвижности компонентов экстракта на пластинках ТСХ; жирным шрифтом выделены значения  $R_f$  идентифицированных соединений.

Note: \* – the retardation factor of the extract components per TLC plates;  $R_f$  values of identified compounds are highlighted in bold.

Таблица 3 / Table 3

Содержание водорастворимых гемицеллюлоз в образцах, отобранных на разной глубине отвала на полигоне длительного хранения КДО / The content of water-soluble hemicelluloses in samples taken at different dump depths at the BWW long-term storage landfill

Скважина Borehole	Глубина отбора образцов, м Sample depth, m	Содержание водорастворимых гемицеллюлоз, % The content of water-soluble hemicelluloses, %
1	9–10	0,36
	11–12	0,19
	12–13	0,14
2	3–4	0,69
	4–6	0,60
	7–9	0,19
	18–21	0,19

экстрактов показал, что во всех образцах имеется вещество, отвечающее по коэффициенту подвижности ванилиновой кислоты ( $R_f=0,6$ ), в эфирном и хлороформном экстрактах содержится вещество, совпадающее по коэффициенту подвижности с дигидрохверцетином ( $R_f=0,53$ ). Методом ВЭЖХ подтверждено содержание в хлороформном экстракте в следовых количествах дигидрохверцетина ( $t_R=28,6$  мин), ванилиновой ( $t_R=11,6$  мин) и *транс-п*-кумаровой ( $t_R=17,7$  мин) кислот, которые ранее были обнаружены в этилацетатных и гексановых экстрактах.

При анализе образцов КДО на содержание полисахаридов и арабиногалактана в полученной водной экстракцией водорастворимой гемицеллюлозе после кислотного гидролиза методом ВЭЖХ были обнаружены арабиноза, манноза, глюкоза и галактоза, что позволяет охарактеризовать выделенную фракцию ВГМЦ, как смесь водорастворимых гемицеллюлоз – арабиногалактана и глюкоманнана.

Показано, что независимо от глубины залегания и использования для экстракции воды или органических растворителей разной полярности во всех исследуемых образцах обнаружены

одинаковые компоненты – дигидрокверцетин, ванилиновая и *транс-п*-кумаровая кислоты.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания «Научно-обоснованные биотехнологии для улучшения экологической обстановки и здоровья человека на Севере». Регистрационный номер в системе ЕГИСУ 1021051101411-4-1.6.23.*

## References

- Lukina N.V. Global challenges and forest ecosystems // *Her. Russ. Acad. Sci.* 2020. V. 90. No. 6. P. 303–307. doi: 10.1134/S1019331620030119
- Green Economy and the goals of sustainable development for Russia: a collective monograph / Eds. S.N. Bobylev, P.A. Kiryushin, O.V. Kudryavtseva. Moskva: Ekonomicheskii fakultet MGU imeni M.V. Lomonosova, 2019. 284 p. (in Russian).
- Srisruthi K.M. Circular economy // *International Journal of Trend in Scientific Research and Development.* 2020. V. 1. No. 6. P. 566–569. doi: 10.31142/ijtsrd46410
- Stahel W.R. The circular economy // *Nature.* 2016. V. 531. No. 7595. P. 435–438. doi: 10.1038/531435a
- Wenig C., Dunlop J.W.C., Hehemeyer-Cürten J., Reppe F.J., Horbelt N., Krauthausen K., Fratzl P., Eder M. Advanced materials design based on waste wood and bark // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2021. V. 379. No. 2206. Article No. 20200345. doi: 10.1098/rsta.2020.0345
- Ufimtsev K.G., Beshley I.V., Shirshova T.I. The content of extractive substances in the products of destruction of bark-woods wastes generated during long-term storage, taking into account the vertical gradient // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 4. P. 144–150 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-144-150
- Volodin V.V., Shubakov A.A., Volodina S.O., Shergina N.N., Vasilov R.G. Trends in the development of methods of disposal of bark and bark-wood waste of long-term storage (review) // *Agricultural Science Euro-North-East.* 2022. V. 23. No. 5. P. 611–632 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632
- Kulikova Yu., Sukhikh S., Babich O., Margina Yu., Krasnovskikh M., Noskova S. Feasibility of old bark and wood waste recycling // *Plants.* 2022. V. 11. No. 12. Article No. 1549. doi: 10.3390/plants11121549
- Kolesnikova A.V. Analysis of the formation and use of wood waste at enterprises of the Russian timber industry // *Aktualnyye Voprosy Ekonomicheskikh Nauk.* 2013. No. 33. P. 116–120 (in Russian).
- Kapitsa E.A., Shorokhova E.V., Romashkin I.V., Galibina N.A., Nikerova K.M., Kazartsev I.A. Decomposition of bark as part of logging slashes after clearcuts in forests of Middle Taiga // *Lesovedenie.* 2019. No. 1. P. 38–48 (in Russian). doi: 10.1134/S0024114819010066
- Deyneko I.P., Deyneko I.V., Belov L.P. Investigation of the pine bark chemical composition // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2007. No. 1. P. 19–24 (in Russian).
- Gromova A.S., Lutskiy V.I., Ganenko T.V., Tyukavkina N.A. Flavonoids from the bark of some species of fir, spruce and pine // *Khimiya Drevesiny.* 1978. No. 4. P. 103–105 (in Russian).
- Fedorova T.E., Babkin V.A. Extractives of *Picea obovata* Ledeb. // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2016. No. 4. P. 165–168 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2016041401
- Metsämuuronen S., Sirén H. Bioactive phenolic compounds, metabolism and properties: a review on valuable chemical compounds in Scots pine and Norway spruce // *Phytochem. Rev.* 2019. V. 18. P. 623–664. doi: 10.1007/s11101-019-09630-2
- Babkin V.A., Ostroukhova L.A., Ivanova S.Z., Ivanova N.V., Medvedeva E.N., Malkov Yu.A., Trofimova N.N., Fedorova T.E. Products of deep chemical processing of larch biomass. Technology for obtaining and prospects for use // *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal.* 2004. V. XLVIII. No. 3. P. 62–69 (in Russian).
- Babkin V.A., Ostroukhova L.A., Trofimova N.N. Larch biomass: from chemical composition to innovative products. Novosibirsk: Izdatelstvo Sibirskogo otdeleniya RAN, 2011. 235 p. (in Russian).
- Babkin V.A. Extractive substances of larch wood: chemical composition, biological activity and prospects for practical use // *Innovatika i Ekspertiza: Nauchnye Trudy.* 2017. No. 2 (20). P. 210–224 (in Russian).
- Dion C., Chappuis E., Rippol C. Does larch arabinogalactan enhance immune function? A review of mechanistic and clinical trials // *Nutr. Metab. (Lond.)* 2016. V. 13. Article No. 28. doi: 10.1186/s12986-016-0086-x
- Larch Arabinogalactan // *Altern. Med. Rev.* 2000. V. 5. No. 5. P. 463–466.
- Medvedeva E.N., Babkin V.A., Ostroukhova L.A. Arabinogalactan of larch – properties and prospects for use // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2003. No. 1. P. 27–37 (in Russian).
- Levdanskiy V.A., Levdanskiy A.V., Kuznetsov B.N. Isolation of dihydroquercetin and arabinogalactan from larch wood with water-ethanol solutions // *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya.* 2022. No. 4. P. 107–113 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.20220411959
- Haldar D., Purkait M.K. Lignocellulosic conversion into value-added products: A review // *Process Biochem.* 2020. V. 89. P. 110–133. doi: 10.1016/j.procbio.2019.10.001
- Gu B.J., Dhupal G.S., Wolcott M.P., Ganjyal G.M. Disruption of lignocellulosic biomass along the length of the screws with different screw elements in a twin-screw extruder // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 275. P. 266–271. doi: 10.1016/j.biortech.2018.12.033
- Kamali M., Gameiro T., Costa M.E.V., Capela I. Anaerobic digestion of pulp and paper mill wastes – An overview of the developments and improvement opportunities // *Chem. Eng. J.* 2016. V. 298. P. 162–182. doi: 10.1016/j.cej.2016.03.119

## Комплексная переработка отходов катализаторов в композиционные материалы

© 2024. С. Л. Фукс, к. т. н., доцент,  
С. В. Девятерикова, к. т. н., доцент,  
Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: usr01730@vyatsu.ru

Применение гетерогенных катализаторов в химических технологиях при получении водорода из природного газа приводит к образованию крупнотоннажных отходов. Причиной является физический износ гранул и изменение состава поверхности за счёт её коксования (образования углеродного слоя), приводящего к дезактивации катализатора. В связи с этим разработка технологий извлечения и очистки компонентов отработанных катализаторов является актуальной задачей. Целью данной работы явилось изучение возможности утилизации отходов катализатора ГИАП–8 с использованием продуктов их переработки в качестве исходных материалов при изготовлении композитов. Исследования показали, что извлечённый порошок оксида алюминия можно применять для получения композиционного материала «пластмасса–оксид алюминия», имеющего высокую ударную прочность, а хлоридные и сульфатные соли никеля – для никелирования металлов электрохимическим способом. Кроме того, оба извлечённых компонента можно использовать для получения композиционного электрохимического покрытия «никель–оксид алюминия» при оптимальном содержании дисперсной фазы в электролите, равном 25 г/дм<sup>3</sup>, и плотности катодного тока 2–3 А/дм<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** катализатор, отход, никель, оксид алюминия, композиционные материалы и покрытия.

## Integrated recycling of catalyst waste into composite materials

© 2024. S. L. Fuchs ORCID: 0000-0002-9238-2944  
S. V. Devyaterikova ORCID: 0000-0003-1863-1209  
Vyatka State University,  
36, Moscow St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: usr01730@vyatsu.ru

The steam conversion of natural gas produces carbon monoxide and hydrogen. Hydrogen is used in the synthesis of ammonia and nitric acid. These products are used to obtain ammonium nitrate, which is used as a nitrogen fertilizer and a base substance for explosives. Natural gas is decomposed on the nickel catalyst. Due to the reactions of methane and carbon monoxide reduction to carbon, the catalyst granules are covered with a layer of carbon. Finely dispersed carbon penetrates the pores of the carrier and forms a layer on its surface that shields the catalyst granules and reduces its efficiency. The catalyst must be replaced. In Russia, the most common catalysts are nickel-based aluminum oxide catalysts. Attempts to restore the catalyst waste to its original characteristics do not yield positive result. In this regard, an urgent task is the development of technologies for the extraction and purification of components of spent catalysts. The object of the research was cylindrical granules of spent GИAP–8 catalyst, consisting of a porous carrier  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  with nickel oxide applied to its surface, covered with a layer of carbon. During the decomposition of GИAP–8 catalyst waste, three components were isolated: aluminum oxide, ultrafine carbon powder and nickel salts. Aluminum oxide was used to create plastic-based composites. The resulting plastic–aluminum oxide composite material has high impact strength, but is destroyed at a bending angle of 45–35 degrees. Therefore, its use can only be recommended for the manufacture of massive products. The nickel salts were used to prepare the plating electrolyte, aluminum oxide was used to obtain a coating of “nickel–aluminum oxide”. The maximum aluminum oxide content in the coating was achieved at 25 g/L dispersed phase concentration in the electrolyte. The optimal cathode current density was 2–3 A/dm<sup>2</sup>.

**Keywords:** catalyst, waste, nickel, aluminum oxide, composite materials and coatings.

Включение твёрдых отходов в процесс рециклинга является актуальной задачей [1, 2]. В процессе паровой конверсии (риформинга) природного газа образуется оксид углерода и водород. Водород применяют в технологиях синтеза аммиака и азотной кислоты [3, 4]. Эти продукты используются для получения аммиачной селитры, используемой в качестве азотного удобрения и базового вещества для взрывчатых веществ [5–7].

В трубчатом реакторе, обогреваемом огневыми горелками, процесс разложения природного газа протекает с выделением тепла (+226 кДж/моль) на никелевом катализаторе при температуре 800–1000 °С [8, 9].

Обычно синтез-газ получают при соотношении  $H_2O/CH_4=1:3$  и  $(H_2+CO_2)/(CO+CO_2)\approx 3$ , пригодном для синтеза аммиака. В риформинг-печи часть метана диссоциирует на углерод и водород  $CH_4\leftrightarrow C+2H_2$  [7]. При протекании побочных реакций взаимодействия  $CO$  и  $CH_4$  с парами воды содержание  $CO_2$  в синтез-газе несколько выше. Кроме того, возможны побочные реакции конверсии природного газа, продукты которых загрязняют водород и катализатор. При восстановлении монооксида углерода образуется некоторое количество углерода ( $2CO\rightarrow C+CO_2$ ). За счёт реакций восстановления метана и оксида углерода до углерода гранулы катализатора покрываются слоем углерода. Мелкодисперсный углерод проникает в поры носителя и образует на его поверхности слой, экранирующий гранулы катализатора и снижающий эффективность его действия [10]. Требуется замена катализатора.

В России наиболее распространёнными катализаторами являются никелевые на основе оксида алюминия, созданные в Государственном институте азотной промышленности (ГИАП). Катализаторы марок ГИАП–3 ( $\gamma-Al_2O_3$  – 95% и Ni – 5%) и ГИАП–8 ( $\gamma-Al_2O_3$  – 90–94%, NiO 6–10%) предназначены для получения водорода конверсией природного газа.

Никель – дефицитный металл. Его содержание в литосфере составляет около 0,02 масс. %. Исчерпание разведанных месторождений привело к необходимости использования взамен бедных руд накоплений никельсодержащих отходов.

При длительном хранении на шламо-накопителях отходов катализаторов последние постепенно разрушаются. За счёт высокой влажности и повышенной кислотности атмос-

феры и почв происходит коррозия никеля и химическое растворение оксида никеля и его солей. Ионы никеля попадают в водные объекты и почвенные растворы. Присутствие в почве подвижных форм никеля опасно для биоты. Кроме того, в результате взаимодействия ионов никеля с загрязнённой атмосферой и ливневыми водами предприятия, производящего хлор и хлорпроизводные, возможно образование хлорида никеля, относящегося к 1-му классу опасности.

Несмотря на то, что компоненты отходов катализатора могут использоваться во многих отраслях промышленности, степень их извлечения низкая из-за сложности состава отходов и отсутствия технологий их переработки. В настоящее время также существуют методы частичного восстановления функций использованного катализатора ГИАП–8. Отработанный катализатор ГИАП–8 восстанавливают растворением NiO в азотной кислоте с последующей пропиткой раствором  $Ni(NO_3)_2$  прокалённых гранул носителя ( $T=1250-1300$  °С). Активность такого катализатора зависит от температуры его обработки и составляет 28,0–62,9% при содержании массовой доли метана в исходном газе 92%. Причиной низкой активности является загрязнение раствора  $Ni(NO_3)_2$  примесями щелочных и щелочноземельных металлов, железа и серы. Для повышения активности катализатора требуется дополнительная очистка раствора  $Ni(NO_3)_2$ , что трудоёмко в производственных условиях и экономически не выгодно [11].

При окислении метана на Ni-содержащих катализаторах, полученных методом мокрой пропитки, показано, что можно получить 95%-ную конверсию  $CH_4$  и почти 96%-ную селективность по  $H_2$  при соотношении  $CH_4/O_2=2$  при использовании воздуха в качестве окислителя при 1 атм и 800 °С. При нанесении никеля на носитель – термостабильный  $\gamma-Al_2O_3$  наблюдается 98% конверсия метана. Однако при этом снижается концентрация диоксида углерода, увеличивается концентрация водорода и монооксида углерода в продуктах реакции [12].

Исходя из анализа работ [9–12] следует, что попытки восстановить отход катализатора до первичных характеристик не дают положительного результата, так как он состоит из загрязнённого инертного носителя ( $\gamma-Al_2O_3$ ), никеля, его оксида и углерода, соотношение которых зависит от условий эксплуатации оборудования. В связи с этим необходима комплексная переработка этих материалов

для экономного расходования запасов минерального сырья и растущей потребности в продуктах конверсии природного газа для использования в производствах аммиака, азотных удобрений и взрывчатых веществ [6, 7] и в других современных технологиях [13, 14]. В связи с этим актуальной задачей является разработка технологий извлечения и очистки компонентов отработанных катализаторов.

При разложении отходов катализаторов ГИАП образуется три компонента: оксид алюминия, порошок ультрадисперсного углерода и соли никеля.

Целью данной работы явилось изучение возможности разделения отходов катализатора ГИАП–8 с использованием продуктов их переработки в качестве исходных материалов при изготовлении композиционных материалов и покрытий, обладающих новыми физическими и химическими свойствами.

## Объекты и методы исследования

Объектом исследований являлись цилиндрические гранулы отработанного катализатора марки ГИАП–8, состоящие из пористого носителя –  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  с нанесённым на его поверхность оксидом никеля, покрытые слоем углерода.

Углерод с поверхности гранул удаляли механически, промывали дистиллированной водой и сушили при температуре 105 °С в сушилке марки SNOL 58/350 LSP11 (AB UMEGA-GROUP, Литва). Гранулы без углерода измельчали помолом вручную в металлической ступке металлическим пестиком до размера 10–20 мкм и обрабатывали 20%-ной серной кислотой в течение 60 мин при  $T=20$  °С. Полученный раствор сульфата никеля фильтровали через бумажные фильтры, а оксид алюминия высушивали при температуре 105 °С до постоянной массы в сушилке марки SNOL 58/350 LSP11 и использовали в качестве дисперсной фазы для получения композиционных электрохимических покрытий (КЭП).

Для нанесения никеля и КЭП использовали электрохимическую систему с выпрямителем Matrix DC Power Supply, к клеммам которого последовательно присоединяли необходимое количество ячеек с никелевыми анодами по краям и катодом из латуни марки Л85 в центре. Каждую ячейку заполняли постоянным объёмом электролита, причём в одной из ячеек дисперсной фазы не было, а в других оно было различным. После электро-

лиза определяли массу полученных покрытий ( $m_{\text{пр1}}$  – это масса никелевого покрытия,  $m_{\text{пр2}}$  – это масса КЭП). В соответствии с законом Фарадея рассчитывали теоретическую массу покрытия ( $m_{\text{теор}}$ ). Выход по току никеля ( $W_{\text{Ni}}$ , %) определяли по уравнению  $W_{\text{Ni}} = (m_{\text{пр1}} / m_{\text{теор}}) \cdot 100\%$ . Массу дисперсной фазы в КЭП Ni– $\text{Al}_2\text{O}_3$  принимали как разность между массой КЭП, полученного при электролизе ( $m_{\text{пр2}}$ ), и массой никеля ( $m_{\text{пр1}}$ ), то есть  $m_{\text{дисперсной фазы}} = m_{\text{пр2}} - m_{\text{пр1}}$ . С учётом полученных результатов рассчитывали долю дисперсной фазы в КЭП Ni– $\text{Al}_2\text{O}_3$ , деля массу дисперсной фазы на массу КЭП.

Извлечённый из отработанного катализатора порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  перемешивали с расплавленной при температуре 180–230 °С пластмассой, представляющей собой смесь отходов полиэтилена высокого давления, парафина и стеарата кальция в соотношении 2:1:0,01 соответственно. Из смеси готовили отливки различной формы. Для выяснения оптимального состава композиционного материала использовали соотношения пластмассы и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5:1 и 5:0,3.

Механические свойства полученных композиционных материалов изучали методом свободнопадающего груза (ГОСТ Р 53655.1–2009) и методом изгиба плоских образцов в виде пластин толщиной 2–3 мм (ГОСТ Р 56810–2015).

## Результаты и обсуждение

Измельчённый оксид алюминия применяли для создания композитов на основе отходов пластмасс [15], а также в качестве дисперсной фазы для КЭП Ni– $\text{Al}_2\text{O}_3$  [16–20]. Никельсодержащие растворы использовали для приготовления электролита при получении КЭП. Состав электролита приведён в таблице 1.

Кислотность электролита не превышала 3,0–3,6. Плотность катодного тока составляла 2,0–4,0 А/дм<sup>2</sup>. Время осаждения – 30 мин.

Результаты переработки отходов катализатора ГИАП–8 приведены в таблице 2.

Единовременная загрузка катализатора ГИАП–8 в риформинг-печь составляет 2 т. Замена происходит через 6 месяцев эксплуатации в соответствии с технологическим регламентом производства. Следовательно, ежегодное удаление на шламонакопитель отходов катализатора из одного аппарата составляет 4 т. Количество оксида никеля, извлечённого из этих отходов, может составлять до 141,2 кг.

Результаты исследований механических свойств полученных композиционных материалов методом свободно падающего груза по-

Таблица 1 / Table 1

Состав электролита никелирования / Nickel plating electrolyte composition

Компоненты электролита Electrolyte components	Химическая формула Chemical formula	Концентрация, г/л Concentration, g/L
Сульфат никеля семиводный Nickel sulfate heptahydrate	$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	200
Хлорид никеля шестиводный Nickel chloride hexahydrate	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	75
Борная кислота / Boric acid	$\text{H}_3\text{BO}_3$	40
Оксид алюминия / Aluminum Oxide	$\text{Al}_2\text{O}_3$	15–117

Таблица 2 / Table 2

Материальный баланс переработки отхода катализатора ГИАП–8  
Material balance of GIAP–8 catalyst waste processing

Расход / Expenditure		Приход / Coming		
Количество гранул, шт Number of granules, pcs	Масса гранул, г Granule weight, g	Масса компонентов, г Weight of components, g		Содержание, % Content, %
100	422±21	Алюминия оксид Aluminum oxide	378±19	89,66
		Углерод / Carbon	28,7±1,4	6,81
		Никеля оксид / Nickel oxide	14,9±0,8	3,53
Итого / Total	422	Итого / Total	422	100

Таблица 3 / Table 3

Характеристика композиционного электрохимического покрытия Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
Characteristics of Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite electrochemical coating

Содержание дисперсной фазы в электролите, г/л Dispersed phase content in the electrolyte, g/L	Масса образцов до электролиза, г Weight of samples before electrolysis, g	Масса образцов после электролиза, г Weight of samples after electrolysis, g	$m_{пр}$ , г $m_{pr}$ , g	Масса дисперсной фазы в покрытии, г Weight of dispersed phase in the coating, g	Содержание дисперсной фазы в покрытии, % Dispersed phase content in the coating, %
0	2,2133	2,3517	0,1384	0	0
15	3,2521	3,5385	0,2864	0,1480	51,68
25	3,1295	3,5966	0,4671	0,3287	70,37
50	2,0640	2,3818	0,3178	0,1794	56,45
117	2,1387	2,4038	0,2651	0,1267	47,79

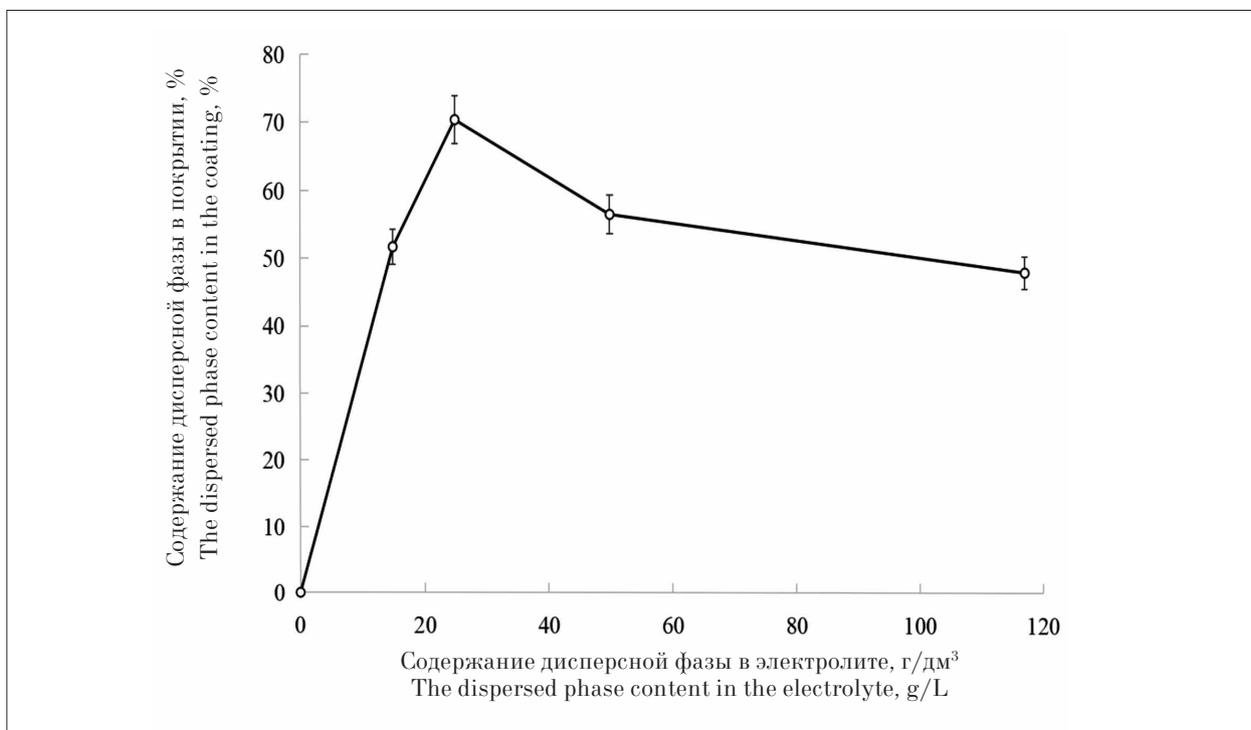
казали, что при массе падающего груза 0,1 кг разрушения изделий из композитов размером 45×45×18 мм не наблюдается, то есть материалы имеют высокую ударную прочность.

Результаты исследований механических свойств полученных композиционных материалов методом изгиба плоских образцов показали, что они разрушаются при величине угла изгиба 45–35 град, то есть имеют низкую механическую прочность. Следовательно, можно рекомендовать применение композиционного материала пластмасса–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> только для изготовления массивных изделий.

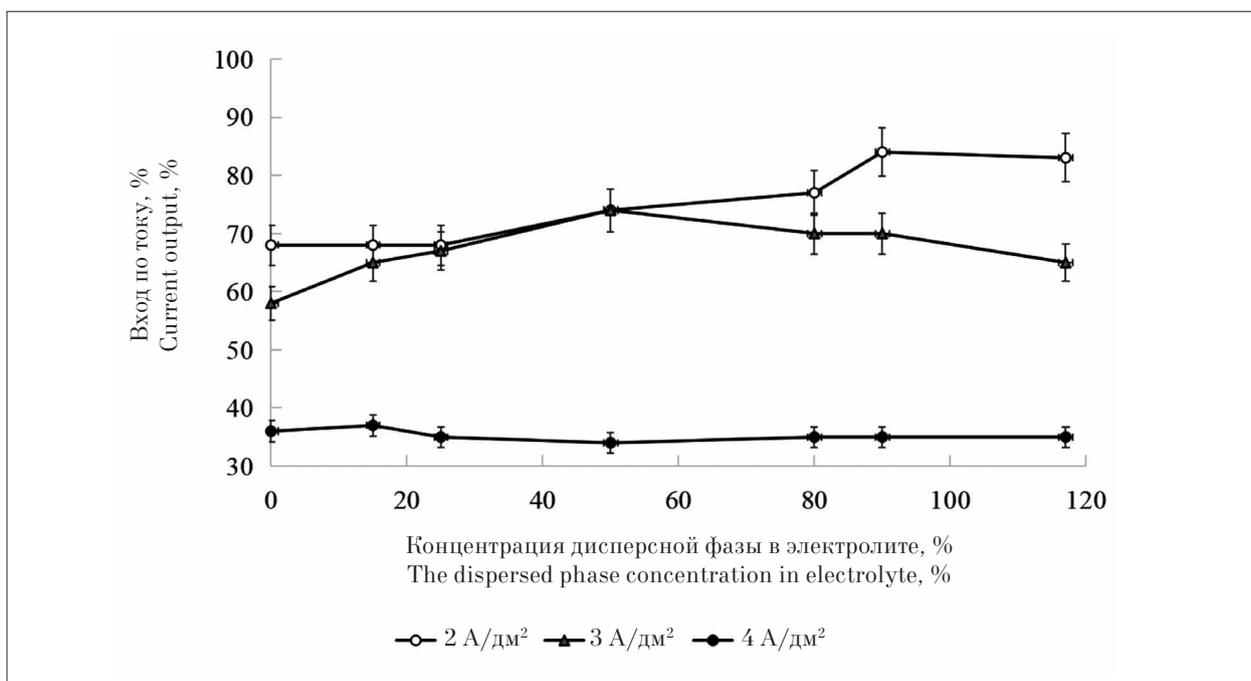
Результаты нанесения никеля и КЭП Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на образцы латуни марки Л85 при катодной плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup> приведены в таблице 3 и на рисунке 1. Погрешность эксперимента составляла 5%.

Из приведённых в таблице 3 результатов видно, что состав КЭП Ni–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> зависит от концентрации дисперсной фазы в электролите.

Из результатов, приведённых в таблице 3 и на рисунке 1, следует, что содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в КЭП максимально при концентрации дисперсной фазы в электролите 25 г/дм<sup>3</sup>. При дальнейшем увеличении концентрации Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Рис. 1.** Зависимость доли дисперсной фазы в КЭП Ni – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от её концентрации в электролите никелирования  
**Fig. 1.** Dependence of the dispersed phase fraction in Ni – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite electrochemical coating on its concentration in the nickel plating electrolyte



**Рис. 2.** Зависимость выхода по току никеля от концентрации дисперсной фазы в электролите никелирования при плотности тока, А/дм<sup>2</sup>:  
 ● – 2,0, ○ – 3,0, ▲ – 4,0  
**Fig. 2.** Nickel current output dependence on the dispersed phase concentration in the nickel plating electrolyte at current density, A/dm<sup>2</sup>:  
 ● – 2.0, ○ – 3.0, ▲ – 4.0

в электролите доля дисперсной фазы в покрытии снижается. Нелинейный ход зависимости обусловлен влиянием частиц дисперсной фазы, находящихся в приэлектродном слое, на процесс восстановления гидратированных ионов  $\text{Ni}^{2+}$  [15]. Подвод частиц  $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  к поверхности катода при постоянной плотности тока зависит от их диффузии через слой  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Процесс восстановления  $\text{Ni}^{2+}$  происходит как на поверхности катода, так и на частицах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , сорбированных катодом. Кроме того, происходит захват частиц дисперсной фазы слоем восстановленного никеля [16, 17]. При увеличении концентрации  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в электролите диффузия ионов никеля в виде  $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$  осложняется более плотным слоем дисперсной фазы у поверхности катода. Масса частиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , участвующих в формировании на катоде слоя  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , постепенно снижается до предельного значения, соответствующего равновесию процессов подвода ионов никеля в зону реакции и скорости формирования пролицируемого слоя дисперсной фазы [18].

Следовательно, для получения КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  с максимальным содержанием оксида алюминия процесс осаждения необходимо осуществлять при концентрации дисперсной фазы 25 г/дм<sup>3</sup>.

Результаты зависимости выхода по току никеля от содержания дисперсной фазы приведены на рисунке 2.

Выход по току никеля минимален при плотности тока 4 А/дм<sup>2</sup>. Следовательно, для получения КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  с максимальным количеством дисперсной фазы необходимо использовать плотность катодного тока в интервале 2–3 А/дм<sup>2</sup> при концентрации дисперсной фазы в электролите 15–80 г/дм<sup>3</sup>.

Качество поверхности КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  при использовании различных концентраций  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в электролите отличается. На поверхности покрытия, полученного из электролита без добавки  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеются дефекты в виде питтинга. Это обусловлено незначительным загрязнением никельсодержащих солей, полученных из отходов катализатора и кислот растворимыми примесями. Нанесение КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  на блестящую поверхность латунных образцов показало, что поверхность КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  равномерная, матовая, с включением в никель оксида алюминия в виде более светлых участков, распределённых по поверхности образца. Места внедрения оксида алюминия более выражены при осаждении КЭП из электролита, содержащего  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в количестве 117 г/дм<sup>3</sup>. Повышение качества поверхности

обусловлено адсорбцией растворимых примесей частицами дисперсной фазы.

Таким образом, рекомендуется использование переработанных отходов катализаторов для получения КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$  без дополнительной очистки солей и дисперсной фазы от растворимых примесей.

## Заключение

В результате работы механически очищенные гранулы катализатора, измельчённые и подвергнутые химической обработке, разделены на три составляющие: ультрадисперсный углерод, порошок оксида алюминия, а также хлоридные и сульфатные соли никеля.

Исследования показали, что порошок оксида алюминия можно применять для получения композиционного материала пластмасса– $\text{Al}_2\text{O}_3$  при изготовлении изделий сложной формы, а хлоридные и сульфатные соли никеля – для никелирования металлов электрохимическим способом.

Установлено, что при совместном использовании порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и солей никеля образуется электролит–суспензия, применение которой позволяет получать КЭП  $\text{Ni}-\text{Al}_2\text{O}_3$ , состав и качество которых зависят от концентрации дисперсной фазы и плотности тока на катодах.

## References

1. Fuchs S.L., Devyaterikova S.V. Recycling of waste from primary chemical power sources // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 119–123 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-119-123
2. Fuks S.L., Devyaterikova S.V. Utilization of industrial wastes for sorption of toxic gases // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 110–117 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-110-117
3. Demchenko V.G. Preliminary conversion of methane with recirculation gases // *Modern science: research, ideas, results, technologies*. 2010. No. 2 (4). P. 201–205 (in Russian).
4. Ammonia production / Ed. V.P. Semenov. Moskva: Chemistry, 1985. 368 p. (in Russian).
5. Atroshchenko V.I., Kargin S.I. Nitric acid technology. Moskva: State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature, 1962. 515 p. (in Russian).
6. Chernyshev A.K., Levin B.V., Tutolukov A.V., Ogarkov A.A., Ilyin V.A. Ammonium nitrate: properties, production, application. Moskva: ZAO "Infohim", 2009. 512 p. (in Russian).
7. Kolganov E.V., Sosnin V.A. Status and development prospects of explosives in Russia and abroad // *Vzryvnoe delo*. 2008. No. 100-57. P. 20–33 (in Russian).

8. Tarasov A.L., Kustov A.L., Kalenchuk A.N., Sokolovskii P.V., Bogdanov V.N., Gilyadov I.G. Steam conversion of methane on fechral // Russ. J. Phys. Chem. A. 2020. V. 94. No. 9. P. 1962–1964. doi: 10.31857/S0044453720090289
9. Krylov O.V. Heterogeneous catalysis. Moskva: Akademkniga, 2004. 680 p. (in Russian).
10. Krylov O.V. Carbon dioxide conversion of methane into synthesis gas // Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. 2000. V. 44. No. 1. P. 19–33 (in Russian).
11. Özdemir H., Faruk Örs zömer M.A., Ali Cürkaynak M. Preparation and characterization of Ni based catalysts for the catalytic partial oxidation of methane: Effect of support basicity on H<sub>2</sub>/CO ratio and carbon deposition // Int. J. Hydrogen. 2010. V. 35. No. 22. P. 12147–12160. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.08.091
12. Dadahodzhaev A.T., Mamataliev N.N. Methods of nickel extraction from production waste and its application // Universum. Tehnicheskie nauki. 2019. No. 4 (61). P. 27–32 (in Russian).
13. Dossumov K., Myltykbaeva L., Ergazieva G. Nickel-containing catalysts for methane oxidation to synthesis gas // Chemical Bulletin of Kazakh National University. 2014. V. 76. No. 4. P. 24–28 (in Kazakh). doi: 10.15328/chemb\_2014\_424-28
14. Zhan S., Tian Y., Cui Y., Wu H., Wang Y., Ye S., Chen Y. Effect of process conditions on the synthesis of carbon nanotubes by catalytic decomposition of methane // HYPERLINK “https://www.sciencedirect.com/journal/china-particuology” China Particuology. 2007. HYPERLINK “https://www.sciencedirect.com/journal/china-particuology/vol/5/issue/3” V. 5. No. 3. P. 213–219. doi: 10.1016/j.cpart.2007.03.004
15. Kerber M.L. Polymer composite materials: structure, properties, technology. Sankt-Peterburg: TsOP Professiya, 2014. 592 p. (in Russian).
16. Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Analysis of technological features manufacture of three-layer structures with space filler made from composite materials with reactoplastic matrix // Aerospace Engineering and Technology. 2024. V. 2. No. 2. P. 24–51 (in Russian). doi: 10.52467/2949-401X-2024-2-2-24-51
17. Talalaeva G., Paznikova S. Modern composite materials: prospects and risks of application in the field of integrated security and civil defense // Civil Security Technology. 2023. V. 20. No. 1 (75). P. 107–114 (in Russian). doi: 10.54234/CST.19968493.2023. 20.1.75
18. Erdey-Grúz T. Transport phenomena in aqueous solutions. London: Adam Hilger Ltd., 1974. 512 p.
19. Saifullin R.S. Composite electrochemical coatings (development and results over 30 years) // Electrodeposition of metals and alloys / Ed. V.N. Kudryavtsev. Moskva: Izdatelstvo MKhTI im. D.I. Mendeleeva, 1991. P. 133–144 (in Russian).
20. Saifullin R.S. Combined electrochemical coatings and materials. Moskva: Khimiya, 1972. 167 p. (in Russian).

## Очистка сточных вод и отработанных технологических растворов с повышенным содержанием от ионов металлов и органических соединений с использованием метода сорбции в реакторе

© 2024. В. А. Бродский<sup>1</sup>, к. х. н., доцент, С. В. Джима<sup>1</sup>, аспирант, Хейн Тху Аунг<sup>1</sup>, к. т. н., докторант, А. Е. Лебедев<sup>1</sup>, к. т. н., с. н. с., А. Р. Яворский<sup>1</sup>, инженер, Н. М. Макарова<sup>2</sup>, д. х. н., начальник управления экологического контроля,

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9,

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор»

119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 6, e-mail: vladimir\_brodsky@mail.ru

Сточные воды химических, металлургических, обрабатывающих, обогатительных и, особенно, гальванохимических производств характеризуются повышенным содержанием ионов тяжёлых металлов (ТМ), крайне высоким солевым фоном и содержанием органических загрязнителей. Тяжёлые металлы, сбрасываемые с промышленными сточными водами, становятся угрозой для экосистем из-за их небиоразлагаемости и токсичности. Разработаны различные методы удаления ионов ТМ из промышленных стоков. Сорбционный метод остаётся одним из эффективных методов благодаря простоте эксплуатации, экономичности, широкому спектру доступных адсорбентов и способности удалять как органические, так и неорганические загрязнители. Исследовано влияние концентрации солевого фона на эффективность удаления ионов меди, никеля и цинка из модельных сточных вод методом углеадсорбционной очистки с использованием угля марки БАУ-А. Исследования проводились в присутствии хлорида и сульфата натрия и их смеси в концентрациях до 200 г/л при pH 2,5. Установлено, что максимальная эффективность извлечения ионов Cu(II) – 97% достигается в растворе с концентрацией 50 г/л NaCl. Максимальная эффективность извлечения ионов Ni(II) и Zn(II) (58 и 75% соответственно) обнаружена в растворе, содержащем 50 и 150 г/л смеси NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:1), после двухчасового процесса сорбции в реакторе. Изучено влияние продолжительности процесса сорбционной обработки в реакторе на эффективность процесса извлечения ионов металлов. Максимальная эффективность процесса отмечена для ионов Cu(II) (98% в растворе, содержащем 100 г/л Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), при продолжительности обработки 3 ч. Эффективность извлечения ионов металлов сорбцией снижается в ряду Cu – Zn – Ni. Концентрация солевого фона и время процесса оказывают существенное влияние на адсорбцию ионов ТМ.

**Ключевые слова:** сорбция, активный уголь, гальваника, тяжёлые металлы, сточные воды.

## Wastewater and waste technological solutions with high salt content treatment from metal ions and organic compounds by the sorption method in the reactor

© 2024. V. A. Brodskiy<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2266-795X, S. W. Jima<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-5394-7122, Hein Thu Aung<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7998-5599, A. E. Lebedev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6765-7563, A. R. Yavorskiy<sup>1</sup> ORCID: 0009-0007-7004-0293, N. M. Makarova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-1261-0426

<sup>1</sup>D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskya Sq., Moscow, Russia, 125047,

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise “Federal Environmental Operator”, 6, Pyzhevsky lane, Moscow, Russia, 119017, e-mail: vladimir\_brodsky@mail.ru

Wastewater from chemical, metallurgical, processing, enrichment and galvanic industries is characterized by increased content of heavy metal ions (HM), extremely high salt organic pollutants content. Heavy metals in industrial wastewater are hazardous for ecosystems due to their non-biodegradability and toxicity. Various methods have been developed to remove HM ions from industrial wastewater. The adsorption method remains one of the effective ones due to its ease of operation, cost-effectiveness, wide range of available adsorbents and ability to remove both organic and

inorganic pollutants. In this paper the background salinity effect on the copper, nickel and zinc ions removal from model wastewater by adsorption process was studied. Activated carbon BAU-A was used to extract HM ions from a model wastewater solution. Sodium chloride and sodium sulfate were used in different concentrations (up to 200 g/L) at pH 2.5. We found that maximum Cu(II) removal efficiency was 97% with 50 g/L NaCl content. The maximum Ni(II) and Zn(II) adsorption (58 and 75% respectively) was in solution with 50 g/L and 150 g/L NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:1), respectively, after 2-hour sorption process in the reactor. The study examined the effect of time on sorption on the efficiency of the metal ion extraction process. The maximum Cu(II) sorption was after 3 hours of the sorption process and it was 98% in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution (100 g/L). The study showed that the extraction efficiency by sorption decreases in the Cu – Zn – Ni series. The salt content and sorption time has significant effect on adsorption of HM ions.

**Keywords:** adsorption, activated carbon, electroplating, heavy metals, wastewater.

В настоящее время основной задачей промышленной экологии является поиск экономичной и эффективной технологии очистки сточных вод и отработанных технологических растворов. Промывные воды и отработанные технологические растворы обладают токсичностью и опасностью для окружающей среды, что обусловлено, в первую очередь, наличием токсичных ионов тяжёлых металлов (ТМ) в различной концентрации, повышенным солевым фоном и содержанием органических загрязнений. В качестве примера можно привести гальванические, металлургические, кожевенные, текстильные и различные химические производства, которые являются источниками образования сточных вод, содержащих ТМ, масла, жиры, поверхностно-активные вещества и нефтепродукты [1, 2].

Известно множество методов удаления ТМ и органических загрязнений из сточных вод. К таким методам относят сорбцию. Благодаря простоте эксплуатации и широкому спектру применения сорбция считается эффективным методом очистки воды с эффективностью до 99% [3–5]. На данный момент широко применяется процесс сорбционной очистки сточных вод и отработанных технологических растворов от органических загрязнений в сорбционных колоннах, а также путём введения активных углей в реактор [6, 7].

К преимуществам сорбционных методов можно отнести возможность очистки сточных вод, содержащих низкие концентрации загрязняющих веществ, обычно не превышающие 100 мг/л, к недостаткам – наличие стадии регенерации адсорбента регенерирующими растворами и элюатами, а также утилизации самого адсорбента, если регенерация невозможна [4].

Активированный уголь (АУ) является одним из наиболее широко используемых сорбентов благодаря своей высокой эффективности, пористости и большой площади поверхности. Исследования показали, что активированный уголь БАУ-А способен очищать

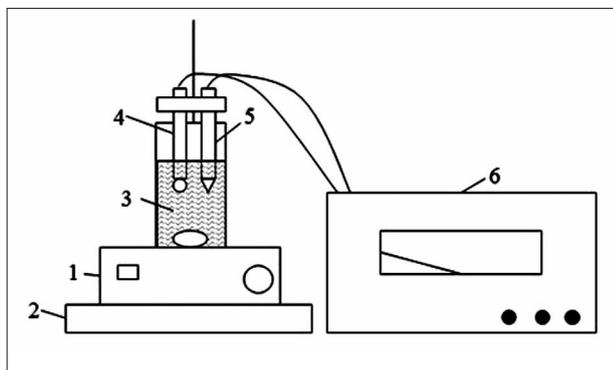
загрязнённые растворы от ионов металлов. Показано, что сорбция ионов металлов на поверхности АУ протекает по механизму простой физической адсорбции, описываемому уравнением Ленгмюра [5, 8].

Целью работы является изучение процессов сорбционной очистки сточных вод и отработанных технологических растворов от токсичных ионов металлов на примере ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) методом сорбции в реакторе и сорбционных колоннах с использованием древесного активного угля марки БАУ. Новизна работы заключается в изучении влияния природы и концентрации фоновых солей на эффективность протекания процесса сорбции ТМ.

### Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования использованы модельные растворы, содержащие ионы Cu, Ni и Zn, солевой фон (NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), а также ряд органических соединений (машинное масло (I-5A, Shell), моторное масло (Valvoline), бензин (AI 95)). Данный перечень загрязняющих веществ характерен для сточных вод гальванохимических производств и цехов металлообработки.

**Методика приготовления модельных растворов.** Для исследования зависимости сорбционного извлечения ионов металлов от времени в реакторе использовали модельные растворы, содержащие ионы Cu(II), Ni(II) и Zn(II) с суммарной концентрацией 10 мг/л, массовое соотношение металлов – 1:1:1. pH модельного раствора 2,5 – соответствует pH кислых промышленных отходов. В качестве сорбента использован активный уголь марки БАУ-А (ТУ 20.59.54-001-44972796-2020). Основные характеристики: размер зёрен >1,5 мм – не более 25,0%; 0,5–1,5 мм – не менее 70,0%, насыпная плотность составляет не более 240 г/дм<sup>3</sup>, суммарный объём пор по воде составляет не менее 1,6 см<sup>3</sup>/г; массовая доля золы не более 10,0%; адсорбционная активность



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки сорбции в реакторе: 1 – магнитная мешалка, 2 – штатив, 3 – стакан с электролитом, 4 – стеклянный электрод, 5 – хлоридсеребряный электрод, 6 – рН метр / **Fig. 1.** The scheme of the experimental sorption setup in the reactor: 1 – magnetic stirrer, 2 – tripod, 3 – glass with electrolyte, 4 – glass electrode, 5 – silver chloride electrode, 6 – pH meter

не менее 70% (по йоду). Сорбент вводился из расчёта 1 г на 100 мл обрабатываемого раствора. Солевой фон: NaCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (соотношение 1:1). Диапазон концентраций фоновых солей: 1–200 г/л.

**Методика удаления тяжёлых металлов методом сорбции в реакторе.** В реактор объёмом 500 мл вводили водные растворы, содержащие CuSO<sub>4</sub>, NiSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub> в объёме 100 мл (рис. 1). Растворы перемешивали магнитной мешалкой BioSanMSH-300 (BIOSAN, Латвия).

В реактор добавляли порошок активированного угля БАУ-А в массовом соотношении 1:100 к модельным растворам. Влияние солей на процесс сорбции ионов ТМ проводили в присутствии NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а также смеси растворов NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в диапазоне концентраций 1–200 г/л, рН 2,5. Контроль рН осуществляли рН-метром И-160 МИ (ООО «Измерительная техника», Россия). Для определения электропроводности растворов использовали портативный кондуктометр Mettler-Toledo Education Line EL 3 (Mettler-Toledo, Швейцария).

**Методы определения концентрации ионов тяжёлых металлов и органических загрязнений.** Контролируемыми параметрами процесса являются: остаточные концентрации неорганических и органических загрязнений в обрабатываемых растворах. Эффективность процесса очистки оценивается по степени извлечения металлов α (%) и показателю ХПК (мгО/л).

Степень извлечения металлов рассчитывают как отношение разницы между исходной

и конечной концентрациями металлов в растворе (в связанной, ионной и молекулярной формах):

$$\alpha = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{кон}}}{C_{\text{кон}}} \cdot 100\%,$$

где C<sub>исх</sub> и C<sub>кон</sub> – начальная и конечная концентрация ионов металла, мг/л.

Массовую концентрацию металлов определяют с использованием атомно-абсорбционного спектрометра KVANT-2А по стандартизированной методике [7, 9]. Интегральный показатель ХПК определяют по ГОСТ 31859–2012:

$$\text{ХПК} = \frac{(a-b)N \cdot 8 \cdot 1000}{V},$$

где a – объём соли Мора на титрование в холостом опыте, мл; b – объём соли Мора на титрование пробы, мл; N – нормальность титрованного раствора соли Мора; V – объём пробы, мл; 8 – эквивалент кислорода.

**Метод определения сорбционной активности сорбентов.** Сорбционная активность сорбентов Γ, (моль/г) рассчитывалась по формуле:

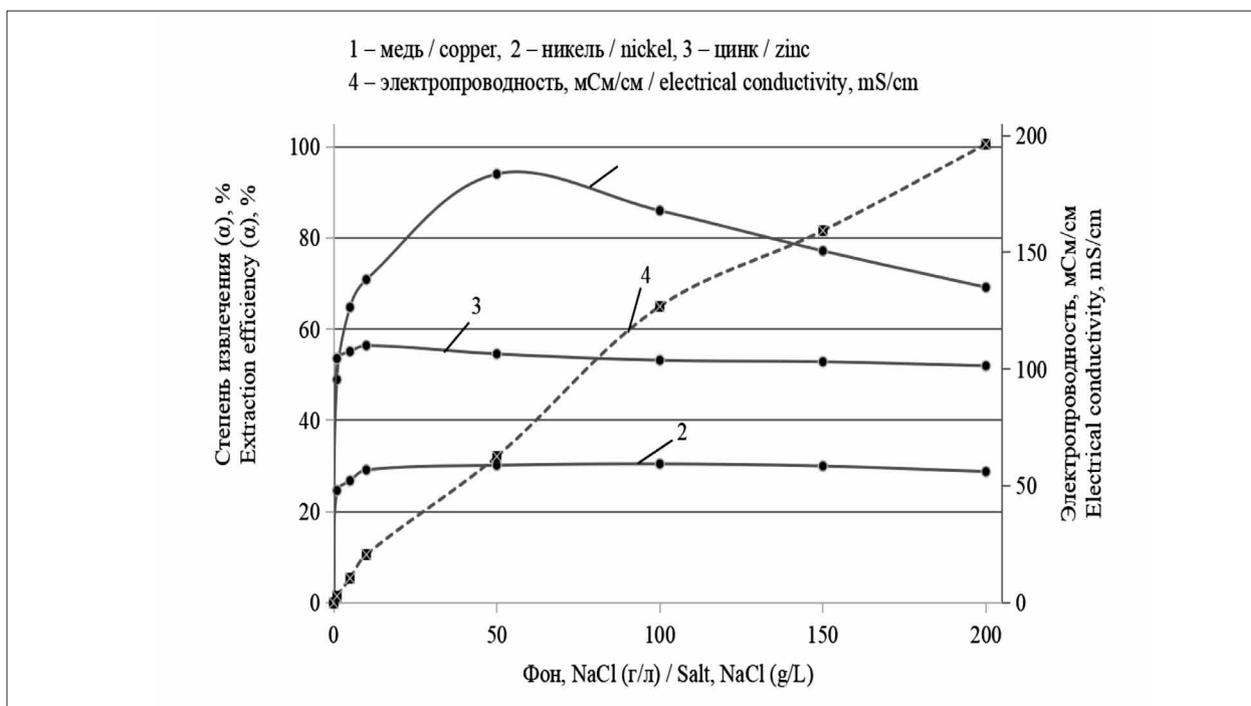
$$\Gamma = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{кон}}) \cdot V_{\text{эл}}}{m},$$

где C<sub>исх</sub> и C<sub>кон</sub> – начальная и конечная концентрация ионов металла, моль/л; V<sub>эл</sub> – объём электролита, л; m – масса сорбента, г.

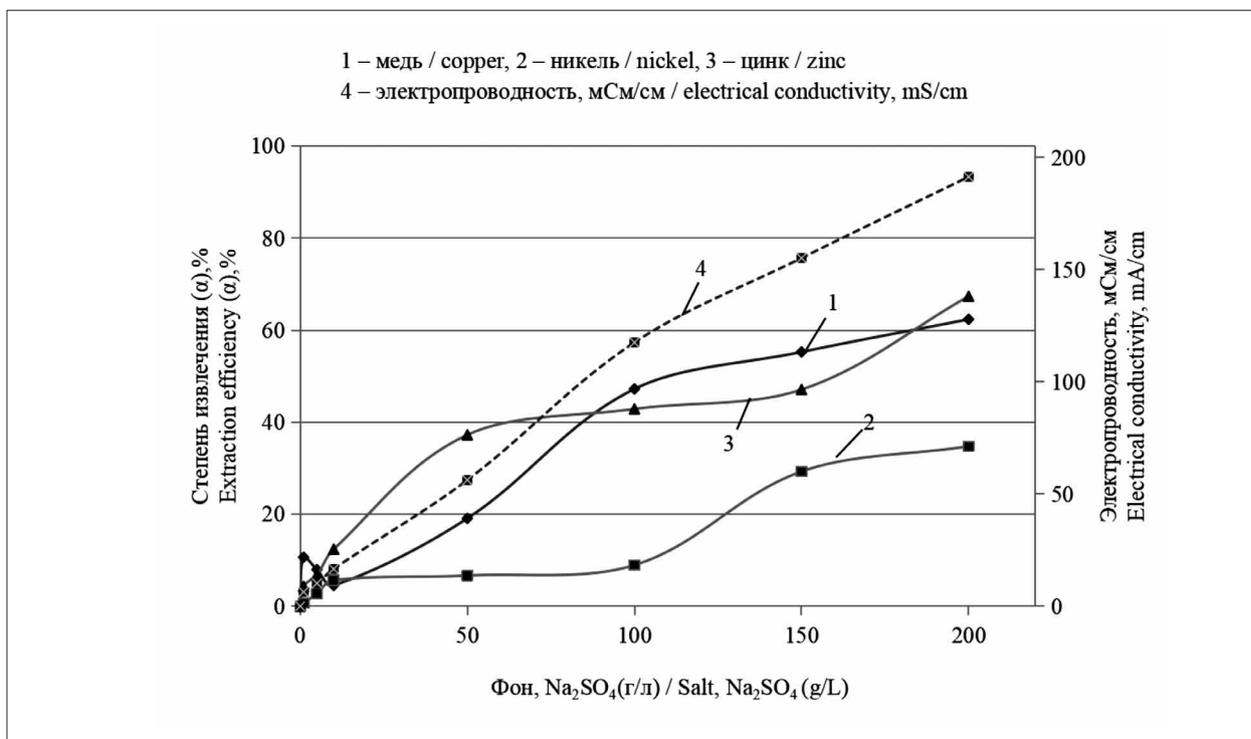
**Обработка экспериментальных данных.** Экспериментальные зависимости получены на основе усреднённых показателей по трём параллельным опытам. Для обработки данных использован метод регрессионного анализа.

## Результаты и обсуждение

**Влияние концентрации и природы электролитов на эффективность очистки растворов, содержащих ионы тяжёлых металлов, методом сорбции в реакторе.** Установлено, что эффективность извлечения ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) методом сорбции в реакторе зависит от концентрации и природы солей в сточных водах. В присутствии раствора NaCl эффективность сорбции возрастает экспоненциально для всех исследованных ТМ с ростом концентрации солевого фона (рис. 2). Наибольшая эффективность процесса извлечения отмечена для ионов Cu(II) – 97% в растворе с концентрацией 50 г/л NaCl. Повышение концентрации соли приводит к снижению эффективности сорбции ионов меди (77%



**Рис. 2.** Зависимость сорбционного извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации NaCl в растворе (рН 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
**Fig. 2.** Dependence of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) sorption extraction on the NaCl concentration in solution (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10g/L)



**Рис. 3.** Зависимость сорбционного извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в растворе (рН 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
**Fig. 3.** Dependence of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) sorption extraction on the Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentration in solution (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10g/L)

в растворе, содержащем 200 г/л NaCl). Эффективность сорбционного извлечения Ni и Zn относительно низка и не превышает 30 и 56% соответственно.

Исследовано влияние  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  на эффективность извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) методом сорбции в реакторе (рис. 3). Установлено, что эффективность извлечения при низких концентрациях  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (менее 10 г/л) крайне низкая. С повышением концентрации солевого фона эффективность сорбционного извлечения возрастает линейно и достигает 62, 34 и 67% для Cu(II), Ni(II) и Zn(II) соответственно в растворах, содержащих 200 г/л  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

На рисунке 4 показана зависимость сорбционного извлечения ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации раствора, содержащего смесь солей NaCl и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Степень извлечения ионов Cu(II), Ni(II) и Zn(II) возрастает с повышением концентрации фоновых солей и достигает максимальных значений (90, 56 и 74% соответственно) при концентрации фона 100 г/л. Этот результат совпадает с исследованием [10, 11] для совместного извлечения Cu и Zn.

Проведённые экспериментальные исследования позволили выявить зависимость эффективности извлечения ионов металлов

методом сорбции в реакторе от природы металла, концентрации и природы солевого фона. Выявлено, что эффективность сорбционного процесса максимальна для ионов меди и снижается в ряду  $\text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ . Можно отметить, что увеличение концентрации солевого фона, содержащего хлорид-ионы, индивидуально и в смеси с сульфат-ионами до 10 г/л приводит к резкому возрастанию степени извлечения металлов с выходом на плато. Дальнейшее повышение концентрации фона, содержащего хлорид-ионы, до значений, близких к пределам растворимости солей, не приводит к существенному изменению значений степеней извлечения исследуемых металлов.

Можно предположить, что скорость сорбции ионов в реакторе возрастает в ряду  $\text{Ni}^{2+} < \text{Zn}^{2+} < \text{Cu}^{2+}$ , что соотносится с данными, полученными для сорбции в колоннах [11, 12].

Исследована сорбционная активность сорбента Г, (моль/г) по отношению к ионам Cu(II), Ni(II) и Zn(II) в растворах фоновых солей (5–200 г/л). Полученные данные представлены на рисунке 5. Можно сделать вывод, что сорбционное извлечение металлов методом сорбции в реакторе зависит от концентрации солей в растворе. На данную способность влияет молекулярная сила соли в растворе сточных вод.

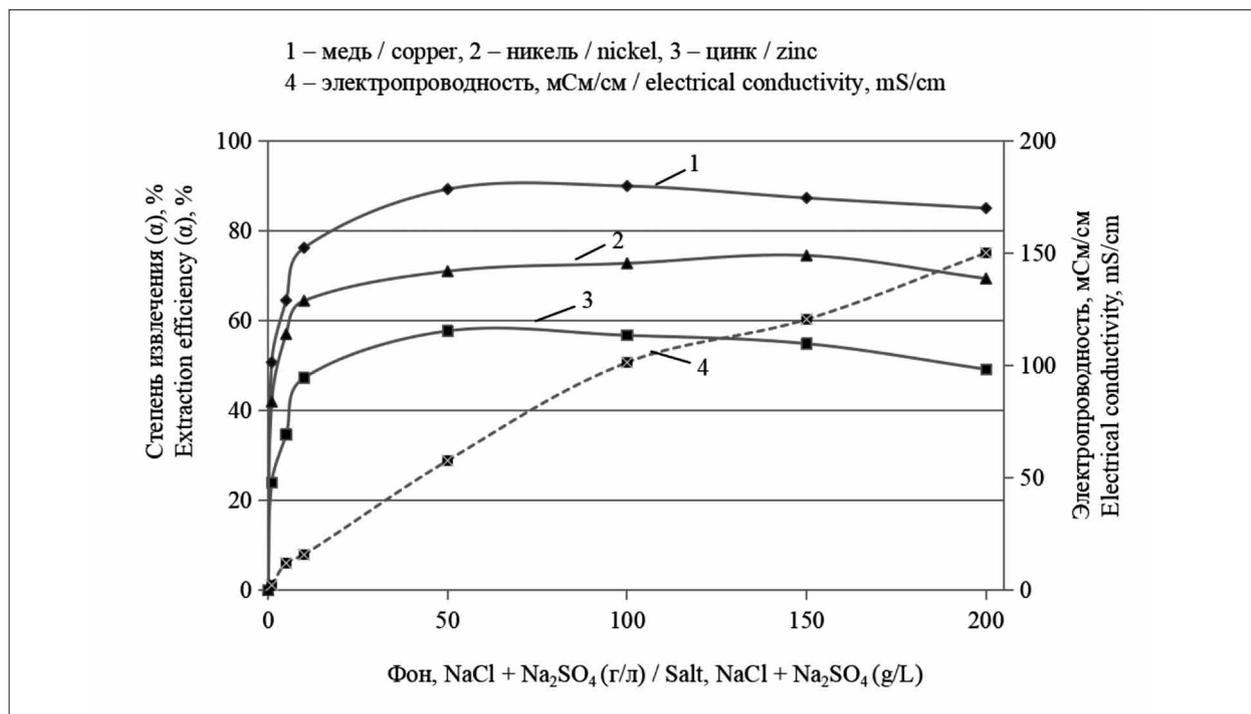
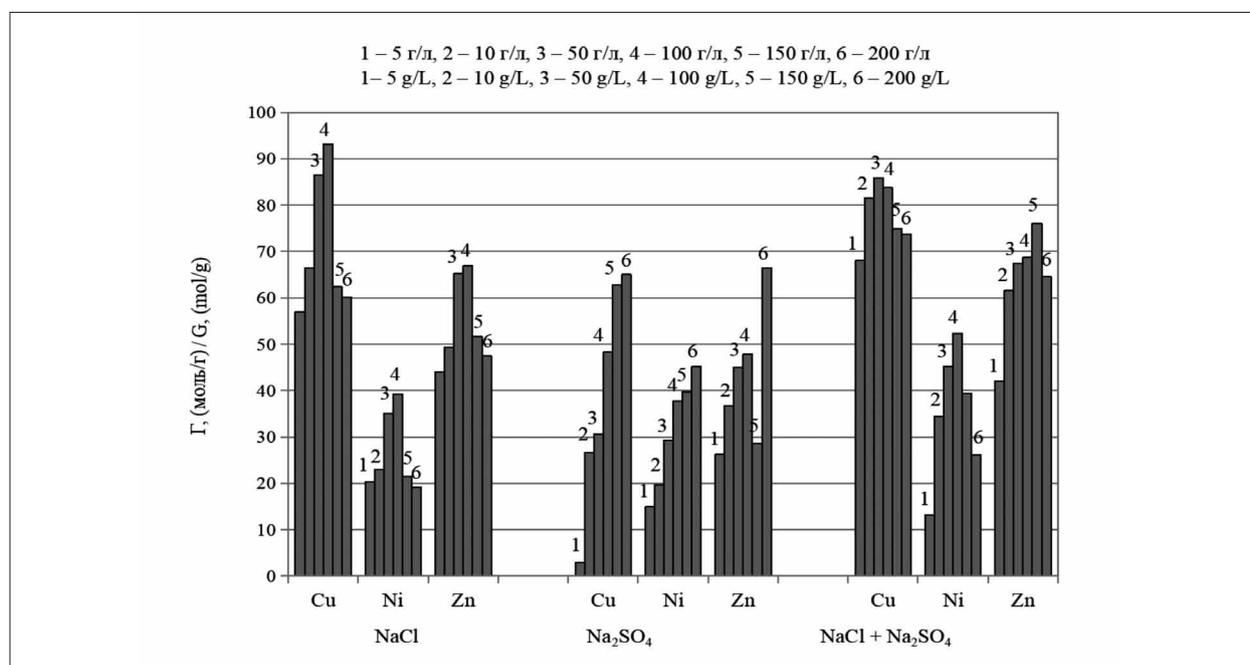


Рис. 4. Зависимость сорбционного извлечения Cu(II), Ni(II) и Zn(II) от концентрации NaCl и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  в растворе (pH 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
Fig.4. Dependence of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) sorption recovery on the NaCl and  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  concentration in solution (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10 g/L)



**Рис. 5.** Зависимость сорбции ионов металлов,  $G$  (моль/г), от природы электролита (рН 2,5; время – 2 ч; БАУ-А – 10 г/л)  
**Fig. 5.** Dependence of metal ions sorption,  $G$  (mol/g), on the electrolyte nature (pH 2.5; time – 2 hours; BAU-A – 10 g/L)

На основании экспериментальных данных, представленных на рисунке 5, можно сделать следующий вывод: сорбционная активность  $G$  (моль/г) металла зависит от концентрации, а также от типа раствора электролита. Более высокая сорбционная активность обнаружена в растворе электролитов NaCl и смеси NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в интервале концентраций 50–150 г/л. В растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> сорбционная активность металлов возрастает с ростом концентрации соли. Сорбционная ёмкость во всех растворах электролитов снижалась в ряду ионов: медь – цинк – никель. При этом остаточная концентрация группы Cu<sup>2+</sup> составляет 0,032 мг/л в растворе NaCl, 0,45 мг/л – в растворе Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и 0,12 мг/л – в растворе NaCl+Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Проведено исследование изменения электропроводности  $\chi$  (мСм/см) исследуемых растворов в процессе их обработки методом сорбции в реакторе. С повышением концентрации солей от 5 до 200 г/л,  $\chi$  растворов возрастает с 3,96 до 201,7 мСм/см для NaCl, с 2,13 до 160,1 мСм/см и с 5,92 до 103,5 мСм/см – для Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и с 2,06 до 150,3 мСм/см – для смеси NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Следует отметить, что через 2 ч после начала процесса сорбции электропроводность для растворов солей с концентрацией 100 г/л снижается для NaCl с 133,1 до 127,8 мСм/см, для Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – с 117,3 до 13,7 мСм/см и для

смеси солей NaCl и Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – с 102,1 до 98,3 мСм/см. Это свидетельствует об участии солевого фона в процессе сорбции [13].

**Комплексный подход к переработке жидких отходов, содержащих органические и неорганические компоненты.** Помимо гальванических, металлургических и машиностроительных производств, характеризующихся повышенным содержанием ионов металлов, ПАВ и органических соединений в сточных водах, пищевые, кожевенные и целлюлозно-бумажные производства также являются источником загрязнения водных объектов органическими загрязнениями [13, 14]. В состав органических загрязнений могут входить белки, органические растворители, углеводы, жиры, нуклеиновые кислоты, красители, а также ароматические галогениды или нитроароматические вещества, стойкие органические загрязнители (СОЗ), которые представляют собой химические соединения и смеси на основе углерода, например полихлорированные дифенилы (ПХД), пестициды, фармацевтически активные соединения (ФАКС), триметоприм (ТМП), пентахлорфенол (ПХФ) и прочие отходы [15–17]. Показано, что углеадсорбционная очистка эффективна для извлечения из сточных вод красителей и органических веществ [18–20].

На основе полученных экспериментальных и литературных данных предложена принци-

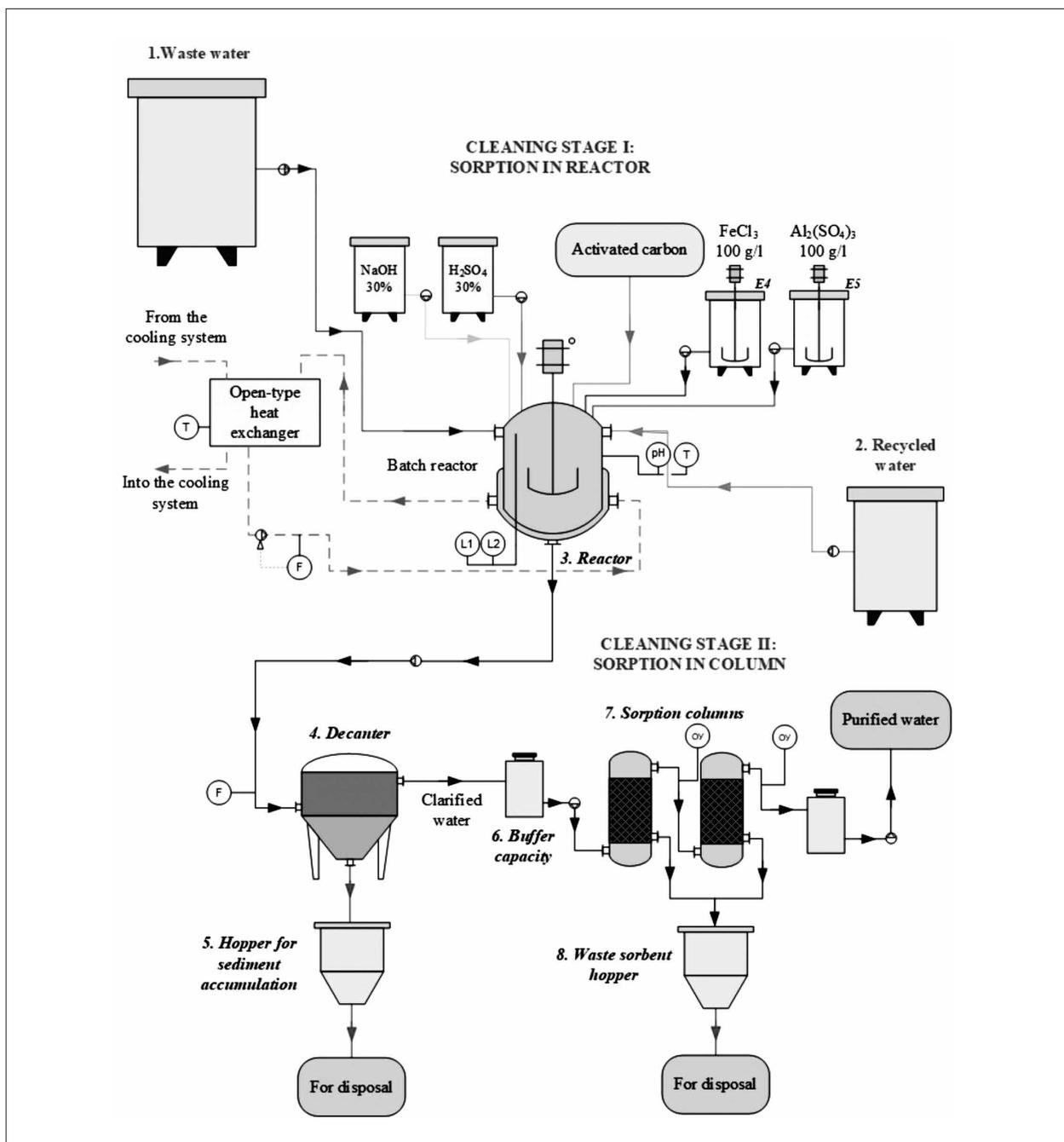


Рис. 6. Принципиальная схема переработки жидких отходов, содержащих органические и неорганические компоненты  
 Fig. 6. Schematic diagram for processing liquid waste containing organic and inorganic components

пиальная схема переработки жидких отходов, содержащих органические и неорганические компоненты, методом сорбции (рис. 6).

Основные стадии переработки отходов, содержащих органические компоненты и ионы ТМ:

- нейтрализация среды путём введения концентрированного раствора гидроксида натрия (или серной кислоты, при необходимости);

- коагуляция органических компонентов с целью осаждения осадка органических соединений. Возможно добавление АУ в виде порошка для улучшения эффективности выделения органических соединений;

- отделение осадка органических соединений в декантере (центробежный сепаратор);

- сорбционная очистка с применением напорных фильтров с загрузкой из АУ.

Эффективность извлечения ионов металлов и органических эмульсий из водных растворов  
Efficiency of metal ions and organic emulsions extraction from aqueous solutions

Загрязнитель Pollutant	рН	Стадия очистки / Cleaning stage			α, %
		Стадия 1 <sup>1</sup> Stage 1	Стадия 2 <sup>2</sup> Stage 2	Стадия 1, 2 <sup>3</sup> Stage 1, 2	
$C_{\Sigma Me} = 50-100$ мг/л / mg/L		Остаточная концентрация $C_{ост}$ , мг/л Residual concentration of $C_{res}$ , mg/L			
$Cu^{2+}$	9–9,5	0,5–1	0,1–1	<0,1	>99
$Ni^{2+}$	10,5–11	1–2	0,05–0,5	<0,1	>99
$Zn^{2+}$	9–9,5	0,5–1,5	0,1–1	<0,1	>99
Органика, ХПК 100–1000 мг/л Organic, COD 100-1000 mg/L		ХПК, мгО/л COD, mgO/L			
Машинное масло Engine oil (I-5A, Shell)	6,5–7,0	20–120	20–75	<10	>99
Машинное масло Engine oil (Valvoline)	6,0–8,0	10–100	5–55	<10	>99
Бензин / Gasoline (AI 95)	6,5–7,0	15–115	15–65	<10	>99
ПАВ / Surfactants (NaDDS)	6,0–10,0	55–600	40–400	<10	>99

Примечание / Note: <sup>1</sup> сорбция в реакторе / sorption in the reactor; <sup>2</sup> сорбция в колонне / sorption in the column; <sup>3</sup> совместно / together.

Стадия нейтрализации реализована путём добавления раствора гидроксида натрия с массовой долей 30 масс. %. В стадии коагуляции использовались растворы хлорида железа и сульфата алюминия, а также АУ.

В таблице представлены данные, характеризующие эффективность совместного процесса очистки воды от ионов ТМ в присутствии АУ, а также очистки воды от эмульсий промышленных масел, бензина, ПАВ в присутствии коагулянта  $Al_2(SO_4)_3$  в составе многокомпонентной смеси, полученные для промышленных стоков действующих предприятий.

Показано, что использование АУ на стадии коагуляции увеличивает эффективность процесса очистки. Из данных таблицы 1 следует, что остаточная концентрация ионов  $Cu^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  при фильтрации в колонне/реакторе совместно с адсорбцией составляет менее 0,1 мг/л. Для органических соединений было определено ХПК после стадий фильтрации в колонне/реакторе совместно с адсорбцией и без неё. Выявлено, что при фильтрации в колонне/реакторе совместно с адсорбцией процесс очистки идёт лучше, ХПК составляет менее 10 мгО/л. Это говорит об эффективности предложенной схемы очистки.

### Заключение

Показано, что углеадсорбционная обработка сточных вод в реакторе позволяет

извлекать из водных растворов ионы ТМ без предварительной коррекции рН, что актуально с точки зрения сокращения затрат на реагентную обработку.

Эффективность обработки зависит от природы фоновых электролитов и металлов. Вне зависимости от природы солевого фона эффективность извлечения металлов уменьшается в ряду  $Cu - Zn - Ni$ . Более высокая степень извлечения ТМ отмечена в присутствии  $NaCl$ : так, остаточная концентрация  $Cu^{2+}$  в растворе  $NaCl$  составила 0,032 мг/л, в растворе  $Na_2SO_4$  и смеси  $NaCl + Na_2SO_4 - 0,45$  и 0,12 мг/л соответственно.

Показано, что технология углеадсорбционной очистки в реакторе с последующей доочисткой в колоннах с загрузкой активированного угля эффективна для сточных вод, загрязнённых органическими соединениями и ионами тяжёлых металлов и позволяет производить очистку до нормативов ПДК для рыбохозяйственных водоёмов.

### References

1. Belova L.V., Vyalkova E.I., Glushchenko E.S., Osipova E.Yu. Electroplating plant sewage technology // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2021. V. 23. No. 3. P. 143–154 (in Russian). doi: 10.31675/1607-1859-2021-23-3-143-154
2. Kolesnikov A.V., Kisilenko P.N., Grafov D.Yu., Il'in V.I. Analysis of the efficiency of electrochemical, membrane and adsorption methods for wastewater treatment technology

by heavy metal ions and organic impurities // *Galvanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2014. V. 22. No. 3. P. 45–53 (in Russian).

3. Merchant R.R., Painter Z.Z. Study of removal of heavy metals from waste water by adsorption // *Int. J. Appl. Eng.* 2019. V. 14. No. 1. P. 63–68.

4. Petukhova Yu.N., Il'ina S.I., Fursenko A.V., Nosyrev M.A. Purification of wastewater from heavy metal ions using sorbents // *Yevraziyskiy Soyuz Uchenykh*. 2019. V. 7. No. 64. P. 51–54 (in Russian). doi: 10.31618/ESU.2413-9335-2019-6-64-254

5. Panfilova O.N. Treatment of urban waste water from ions of heavy metals by using new sorption material // *Gradostroitel'stvo i arkhitektura*. 2020. V. 10. No. 2. P. 22–28 (in Russian). doi: 10.17673/Vestnik-2020-02-4

6. Shilina A.S., Milinchuk V.K. Sorption clearing of natural and industrial waters from cations of heavy metals and radionuclides with new type of high-temperature aluminosilicate adsorbent // *Sorption and chromatographic processes*. 2010. V. 10. No. 2. P. 237–245 (in Russian).

7. Sukharev Yu.I., Lebedeva I.Yu., Apalikova I.Yu., Vertsyukh E.S. Sorption treatment and recycling of wastewater from coke production // *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodospabzheniye*. 2011. V. 38. No. 2. P. 38–54 (in Russian).

8. Linnikov O.D., Rodina I.V., Baklanova I.V., Suntsov A.Yu. Sorption of ions Cu(II) by activated carbon BAU-A // *Sorbtsionnyye i khromatograficheskiye protsessy*. 2018. V. 18. No. 4. P. 554–562 (in Russian). doi: 10.17308/sorpchrom.2018.18/563

9. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I., Kut'yavina T.I. Comparative analysis of the effectiveness of the use of sorbents of different nature with respect to copper(II) ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2018. No. 3. P. 12–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-012-018

10. Dizadji N., Dehpouri S., Vossoughi S. Experimental investigation of adsorption of heavy metals (Copper(II)) from industrial wastewater with Clinoptilolite // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. V. 29. P. 1309–1314. doi: 10.3303/CET1229219

11. Karnib M., Kabbani A., Holail A., Olama Z. Heavy metals removal using activated carbon, silica and silica activated carbon composite // *Energy Procedia*. 2014. V. 50. P. 113–120. doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.014

12. Babel S., Kurniawan T.A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review // *J. Hazard. Mater.* 2003. V. 97. No. 1–3. P. 219–243. doi: 10.1016/S0304-3894(02)00263-7

13. Kavand M., Kaghazchi T., Soleimani M. Optimization of parameters for competitive adsorption of heavy metal ions (Pb<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>) onto activated carbon // *Korean J. Chem. Eng.* 2014. V. 31. No. 4. P. 692–700. doi: 10.1007/s11814-013-0280-8

14. Renu, Agarwal M., Singh K. Heavy metal removal from wastewater using various adsorbents: a review // *J. Water Reuse Desalin.* 2017. V. 7. No. 4. P. 387–419. doi: 10.2166/wrd.2016.104

15. Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu. Heavy metals as a factor of microorganisms metabolism changes (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 2. P. 5–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-005-018

16. Bhavani K., Roshan Ara Begum E., Selvakumar S., Shenbagarathai R. Chitosan – a low cost adsorbent for electroplating waste water treatment // *J. Bioremed. Biodeg.* 2016. V. 7. No. 3. Article No. 346. doi: 10.4172/2155-6199-1000346

17. Savichev O.G., Bazanov V.A., Lomakina N.Yu. Analysis of the efficiency of municipal wastewater treatment in the Tomsk region // *Vestnik nauki Sibiri*. 2012. No. 1 (2). P. 17–24 (in Russian).

18. Sionikhina A.N., Nikiforova T.E. Sorption of heavy metal ions from water solutions cellulose sorbents modified polyvinylpyrrolidone // *Fundamental Research*. 2011. No. 12-4. P. 773–776 (in Russian).

19. Ali I., Asim M., Khan T.A. Low cost adsorbents for the removal of organic pollutants from wastewater // *J. Environ. Manage.* 2012. V. 113. P. 170–183. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.08.028

20. Soldatkina L.M., Sagaidak E.V. Kinetics of adsorption of water-soluble dyes on active carbons // *J. Water Chem. Technol.* 2010. V. 32. No. 4. P. 212–217 (in Russian). doi: 10.3103/S1063455X10040041

## Перспективность технологии плазменно-химической очистки воздуха от формальдегида и муравьиной кислоты в промышленности

© 2024. А. Е. Ефимов<sup>1</sup>, аспирант, А. Г. Бубнов<sup>2</sup>, д. х. н., доцент, Г. И. Гусев<sup>1</sup>, к. х. н., ст. преподаватель, Г. Д. Овчинников<sup>1</sup>, магистрант,  
<sup>1</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000, Россия, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7,  
<sup>2</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 153040, Россия, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33,  
e-mail: artem.efimov.1995@list.ru

Исследована эффективность плазменно-химической технологии очистки воздуха в сравнении с некоторыми технологиями подавления отходящих газов (адсорбция, катализ) при помощи апробированных подходов выбора систем обезвреживания летучих поллютантов: эколого-экономический, экспертный, иерархической процедуры оценивания и критерия относительной общей пользы. Так, эколого-экономический и экспертный подходы, а также критерий относительной общей пользы позволяют сравнить технологии на основе эксплуатационных затрат (технологический риск, энергоэффективность, надёжность и стоимость производственных фондов). При этом иерархическая процедура оценивания, помимо перечисленных показателей, учитывает эргономику и устойчивость к внешнему воздействию. Показано, что плазменно-химическая технология очистки не является приоритетной при выборе систем обезвреживания отходящих газов от формальдегида, поскольку 3 из 4 подходов указывают на неэффективность рассматриваемой технологии относительно адсорбционного метода. При очистке воздуха от паров муравьиной кислоты плазменно-химическая технология в 2 из 4 случаев является настолько же эффективной, как и адсорбционный метод. Рассмотрена эффективность плазменно-химической, каталитической и адсорбционной технологий с точки зрения методики оценки «углеродного следа», позволяющей количественно исследовать эмиссию «парникового газа» не только на этапе эксплуатации оборудования, а также на стадиях производства, транспортировки и утилизации. Полученные значения показателя «углеродного следа» для низкотемпературной плазмы являются лучшими среди сопоставимых доступных технологий, т. к. суммарное количество выбросов CO<sub>2</sub> при её применении сокращается на 80% (в среднем) за счёт того, что относительные общие затраты энергии ниже.

**Ключевые слова:** летучие органические соединения, методы очистки, углеродный след.

## Technology prospects for plasma-chemical air purification from formaldehyde and formic acid in industry

© 2024. А. Е. Efimov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0004-7530-8832, А. G. Bubnov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-7201-9339,  
G. I. Gusev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8528-3403, G. D. Ovchinnikov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5522-1834,  
<sup>1</sup>Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7, Sheremetevsky avenue, Ivanovo, Russia, 153000,  
<sup>2</sup>Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 33, Stroiteley avenue, Ivanovo, Russia, 153040,  
e-mail: artem.efimov.1995@list.ru

The effectiveness of plasma-chemical air purification technology was studied in comparison with some technologies for suppressing waste gases (adsorption, catalysis). We use proven approaches (environmental-economic, expert, hierarchical evaluation procedure and the criterion of relative overall benefit) to selecting systems for neutralizing volatile pollutants. Thus, environmental-economic and expert approaches, as well as the criterion of relative overall benefit, make it possible to compare technologies based on operating costs (technological risk, energy efficiency, reliability and cost of production assets). At the same time, the hierarchical evaluation procedure, in addition to the listed indicators, takes into account ergonomics and resistance to external influences. It is shown that plasma-chemical cleaning technology is not a priority when choosing systems for neutralizing waste gases from formaldehyde, since 3 out of 4 approaches indicate the ineffectiveness of this technology relative to the adsorption method. When cleaning air from formic acid vapors, plasma-

chemical technology in 2 out of 4 cases is as effective as the adsorption method. The effectiveness of plasma-chemical, catalytic and adsorption technologies is considered from the point of view of the methodology for assessing the “carbon footprint”, which makes it possible to quantitatively study the emission of “greenhouse gas” not only at the stage of equipment operation, but also at the stages of production, transportation and disposal. However, the obtained carbon footprint values for low-temperature plasma are the best among comparable available technologies, because the total amount of CO<sub>2</sub> emissions when using it is reduced by 80% (on average) due to the fact the relative total energy costs are lower.

**Keywords:** volatile organic compounds, cleaning methods, carbon footprint.

Среди набора современных технологий очистки воздуха от низких концентраций поллютантов органической природы [1, 2] перспективной является плазменно-химическая технология (ПХТ), благодаря тому, что целевые (менее токсичные относительно удаляемых летучих органических соединений (ЛОС)) продукты деструкции (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) в газоразрядных устройствах оказываются более чистыми и получаются при меньшем числе стадий процесса в сравнении с каталитической и адсорбционной технологиями [4]. Несмотря на перечисленные преимущества, к возможным недостаткам ПХТ относится образование побочных продуктов, например, озона и оксидов азота, являющихся инициаторами фотохимического смога [3]. Однако O<sub>3</sub> и NO<sub>x</sub>, образующиеся в ПХТ, достаточно легко нейтрализовать *in situ* с применением низкотемпературных катализаторов, например, марок ГТТ и АПК, соответственно (НИАП–Катализатор). В совокупности масса используемого дополнительного материала будет значительно ниже по сравнению со значениями, приведёнными в настоящей работе для каталитической очистки воздуха. Также остаётся открытым вопрос, связанный с надёжностью и энергетической эффективностью очистки ПХТ в промышленных масштабах. Вместе с тем, отнести данные характеристики к недостаткам достаточно сложно, ввиду малого количества информации по результатам исследований в указанных направлениях, но этого достаточно для того, чтобы препятствовать промышленной имплементации технологии. Отметим, что ПХТ (совмещённая с катализом) внесена в информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ) и отнесена к категории перспективных систем очистки воздуха [4].

В действительности, консерватизм предприятий в отношении традиционных технологий, и, следовательно, трудности с внедрением оборудования для ПХТ связаны, в том числе, и с отсутствием единого нормативного подхода, позволяющего обосновать выбор внедряемой технологии, с учётом её достоинств

и недостатков. Действующий информационно-технический справочник [2], целью разработки которого являлось создание базового инструмента для внедрения НДТ, обладает внушительным набором информации об эффективности традиционных и перспективных технологий очистки в зависимости от условий работы (в нём присутствуют качественные критерии отнесения технологии к НДТ), однако он не приводит единый инструментарий, позволяющий количественно оценить, сравнить и принять решение о внедрении технологии на основании не только экологических, но и экономических и социальных аспектов.

Анализ литературных данных показал, что сведения, касающиеся подбора и обоснования выбора оборудования для очистки воздуха от ЛОС в промышленности, немногочисленны [5, 6], а существующие публикации содержат в основном алгоритмы выбора технологии [7], либо подходы, учитывающие затраты на оборудование и природоохранные мероприятия [8], поэтому проблема поиска комплексного критерия и подхода его оценки для обоснования выбора очистного технологического оборудования (отвечающего принципам НДТ) является актуальной.

Таким образом, цель настоящей работы представляет собой оценку эффективности ПХТ относительно традиционных физико-химических методов очистки воздуха в условиях промышленной эксплуатации.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись технологии очистки воздуха от ЛОС. Проводилось сравнение технологий очистки воздуха существующими апробированными подходами выбора систем очистки. Выявлялась применимость технологий очистки отходящих газов от ЛОС в том числе и по критерию эффективности. В частности, задачами работы были: 1) подбор и анализ существующих технологий очистки воздуха, указанных в [2] для сравнения их с ПХТ (перспективным – согласно [2]);

2) оценка эффективности очистных технологий, а также их «углеродного следа» [9], на основе ранее апробированных подходов [10].

В качестве подходов для выбора наиболее эффективной технологии были использованы: эколого-экономический, экспертный подходы, иерархическая процедура оценивания и критерий относительной общей пользы.

В эколого-экономическом подходе (ЭЭП) предполагается, что эколого-экономическая эффективность проекта характеризуется системой показателей, отражающих применительно к интересам его участников соотношение затрат и результатов реализации проекта [11]. Эколого-экономический подход предусматривает оценку платы в пределах (равных или менее) нормативов допустимых выбросов или сбросов загрязняющих веществ (ЗВ), технологических нормативов с учётом платёжной базы и ставки платы за выбросы или сбросы  $i$ -го ЗВ [12], а также дополнительных коэффициентов [13].

Экспертный подход (ЭП) – способ, позволяющий оценить экологические показатели качества оборудования или продуктов на основе учёта и обработки мнений группы (комиссии) специалистов-экспертов при помощи системы баллов [14].

Метод анализа иерархий (или иерархическая процедура оценивания (ИПО)) – математический инструмент системного подхода к принятию решений, который не предписывает определяющему/ответственному лицу какому-либо «правильного» выбора направления его действий [15]. При выборе технической системы по ИПО [15] необходимы экспертные оценки для составления исходной матрицы попарных сравнений, на основании которой затем происходит расчёт основных показателей (индекс и отношение согласованности, главное значение матрицы) [15].

Для оценки предпочтительности и надёжности технических систем, а также их рекомендаций к применению, в [16] предлагается использовать комплексный критерий относительной общей пользы ( $W$ ), который, в свою очередь, является отношением математического ожидания предотвращённого ущерба от внезапного прекращения работы (отказа) оборудования к сумме затрат от техногенного ущерба и применения природоохранных мероприятий [17].

**Методика расчёта «углеродного следа».** Порядок оценки (расчёта) «углеродного следа» того или иного производства и/или технологии представляет собой ряд пошаговых действий [9], приведённых ниже:

1. Определение коэффициента выбросов углекислого газа с учётом территориального расположения производственной площадки [18, 19].

2. Расчёт выбросов парниковых газов в результате работы производственного оборудования, работающего от электрической сети, в единицу времени [9].

3. Рассчитанное количество выбросов парниковых газов приводится к единице оцениваемой инновационной продукции в натуральном выражении [9].

4. Оценка выбросов парниковых газов, если на производственной площадке осуществлялось сжигание топлива [10].

5. В том случае, если сорбент/катализатор транспортировался автотранспортом к местам захоронения или переработки, учитывались выбросы парниковых газов при сгорании автомобильного топлива [10].

### Результаты и обсуждение

На сегодняшний день, руководствуясь [2], для обезвреживания отходящих газов от газообразных и парообразных токсичных веществ, применяются физико-химические (адсорбция, конденсация, термическая и каталитическая нейтрализации) и биохимические методы очистки воздушных потоков. Основными параметрами, характеризующими эффективность перечисленных методов, являются: объёмный расход отходящих газов, концентрации ЗВ на входе и требуемая степень очистки.

Поскольку ПХТ относится к физико-химическим методам очистки, то необходимо сравнивать данную технологию с соответствующей группой методов. Более того, из представленных в [2] способов очистки только адсорбция и катализ являются хорошо сравнимаемыми с ПХТ, в т. ч. благодаря сопоставимым диапазонам объёмных расходов очищаемого воздуха.

На следующем этапе нами были проведены оценки по выбору воздухоочистного оборудования от паров муравьиной кислоты ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ) и формальдегида ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). Выбор указанных веществ обусловлен тем, что эти ЛОС относятся к категории критериальных поллютантов, при этом  $\text{CH}_2\text{O}$  распространён в качестве загрязняющего атмосферу вещества [20]. Кроме того,  $\text{CH}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_2\text{O}_2$  являются маркерными веществами для текстильных предприятий и производств основных органических химических веществ, а предприятия по

переработке древесного материала также можно рассматривать в качестве источника  $\text{CH}_2\text{O}$ . Таким образом, для достижения цели работы первоначально было необходимо определить исходные значения выбросов, а также действующие модели очистного оборудования.

В качестве исходных данных для оценок принято, что выбросы  $\text{CH}_2\text{O}_2$  составляют 2,5 т/год (4,2 млрд  $\text{м}^3$ /год) – в результате производства 8150 т/год терефталевой кислоты в России [21] (при условии, что на предприятии установлены НДТ), а выбросы  $\text{CH}_2\text{O}$ , присутствующие на ведущем деревоперерабатывающем предприятии в г. Шуя Ивановской области при получении 250 тыс.  $\text{м}^3$  готовой продукции (древесно-стружечных плит (ДСП) и древесно-волоконистых плит (ДВП)) – 30 т/год формальдегида, что соответствует объёмному расходу отходящих газов – 2,63 млрд  $\text{м}^3$ /год [22].

Среди действующих представителей технологий очистки для оценки эффективности последних при «обезвреживании» от перечисленных поллютантов с заданными расходами было выбрано следующее оборудование:

– адсорбер (для  $\text{CH}_2\text{O}_2$ ) с диапазоном объёмного расхода обрабатываемой среды от 100 до 100000  $\text{м}^3$ /ч; оценённый объём адсорбера составляет 25  $\text{м}^3$  (НПО «ЦЕНТР «ШВ» (1)); в качестве сорбента использовался активированный уголь AP-B с насыпной плотностью 600  $\text{кг}/\text{м}^3$  (Гидродисконт.рф);

– адсорбционная колонна ЗТ-НХТ-Q05 с активированным углём (для  $\text{CH}_2\text{O}$ ); объёмный расход очищаемого воздуха составляет для этого аппарата 40000  $\text{м}^3$ /ч; объём адсорбера составляет 23  $\text{м}^3$  (Приволжский завод газоочистного оборудования (2)); в качестве сорбента применяется активированный уголь марки ВЛ-115 с насыпной плотностью 600  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

– плазменно-химическая установка «Ятаган» с расходом воздуха 100000  $\text{м}^3$ /ч; оценённое потребление электроэнергии – 18 кВт (ООО «НПП «Ятаган» (3));

– каталитическая установка SC, производительностью до 70000  $\text{м}^3$ /ч; объём аппарата 416 и 480  $\text{м}^3$  для  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$ , соответственно; объём катализатора составил 375 и 432  $\text{м}^3$ , а плотность стекловолокна (на которое нанесена платина) 2000  $\text{кг}/\text{м}^3$  (ЗАО «Безопасные Технологии» (4)).

**Результаты эколого-экономического подхода для выбора оборудования.** Оценки экологических платежей и средозащитных затрат при эксплуатации воздухоочистного оборудования на основе эколого-экономического подхода от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$  показали следующие значения (табл. 1).

По данным таблицы 1 можно сделать следующий вывод: при сравнении трёх методов (технологий) очистки воздуха эколого-экономическим подходом с точки зрения степени очистки воздуха и наименьших затрат

Таблица 1 / Table 1  
 Результаты использования ЭЭП для оценки методов очистки воздуха от 2,5 т/год  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и 30 т/год  $\text{CH}_2\text{O}$  / The ecological and economic approach results for evaluating air purification methods form 2.5 t/year  $\text{CH}_2\text{O}_2$  and 30 t/year  $\text{CH}_2\text{O}$

Показатели Indicators	Адсорбция Adsorption	ПХТ Plasma-chemical technology	Катализ Catalysis
	(CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / CH <sub>2</sub> O)		
Степень очистки, % Purification degree, %	99 / 95	99 / 98	95 / 99
Вероятность отказа Failure probability	0,00127 / 0,00130	0,037 / до 0,620	0,620 / 0,037
Капитальные затраты, руб. Capital expenditures, rubles	12199000 / 14300200	6484800 / 7134400	10869760 / 3857200
Амортизация, руб./год Depreciation, rubles/year	1357200 / 1587000	730800 / 791700	1224960 / 428000
Эксплуатационные затраты, руб./год Operating costs, rubles/year	6443220 / 3743544	1551600 / 3850980	8508960 / 5024480
Платежи с очисткой, руб./год Payments with clearing, rubles/year	3 / 6736	3 / 2694	14 / 1347
Затраты по методу, руб./год Costs by method, rubles/year	8370653 / 7074672	2650041 / 5504961	10302744 / 5681456

Таблица 2 / Table 2

Результаты применения ЭП для оценки методов очистки воздуха от 2,5 т/год  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и 30 т/год  $\text{CH}_2\text{O}$  / Results of using an expert approach to evaluate methods for air purification from 2.5 t/year  $\text{CH}_2\text{O}_2$  and 30 t/year  $\text{CH}_2\text{O}$

Метод очистки / Purification method	Экспертная оценка / Expert assessment ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ / $\text{CH}_2\text{O}$ )
Адсорбция / Adsorption	10,8 / 10,5
ПХТ / Plasma-chemical technology	11,7 / 10,8
Катализ / Catalysis	9,7 / 9,2

выгодным является использование именно ПХТ на основе диэлектрического барьерного разряда (для  $\text{CH}_2\text{O}_2$ ), а для  $\text{CH}_2\text{O}$  – каталитический метод (эффективнее на 15%, чем ПХТ только за счёт капитальных затрат на приобретение оборудования). Отметим, что адсорбционный метод кроме всего прочего, хорошо зарекомендовал себя в качестве более надёжного, поскольку вероятности отказа адсорберов 0,00127/0,00130 (основных аппаратов метода), в частности, относительно другого оборудования (3, 4), имеют наименьшее значение.

Вместе с тем, стоит отметить, что одним из ключевых недостатков данного подхода к выбору оборудования является то, что он учитывает исключительно стоимость оборудования и финансовые затраты на его эксплуатацию; кроме того, данный подход практически не учитывает показатели надёжности. Вероятность отказа, приведённая выше, единственный показатель (часть свойства безотказности), позволяющий связать ущерб окружающей среде от применения очистной установки с надёжностью используемого оборудования. Однако, существуют ещё такие свойства надёжности, как ремонтпригодность и сохраняемость (долговечность отображается в амортизационных отчислениях), которые могут оказать влияние на природоохранные затраты, играющие важную роль при выборе лучшей альтернативы.

**Результаты экспертного подхода.** Результаты определения соответствия показателей методов очистки экологическим требованиям и установление экологического уровня качества очистного оборудования, т. е. степени реализации экологических требований, на основе ЭП представлены в таблице 2. В опросе участвовало 6 экспертов.

В ходе опроса среди экспертов (специалистов) было установлено, что для очистки воздуха от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$  наиболее эффективным является плазменный метод. В действительности, ЭП имеет множество недостатков, связанных со сложностями нахождения достаточного

количества экспертов, процедур получения информации и формирования итогового мнения группы по индивидуальным суждениям экспертов, возможность давления авторитетов в группе и т. п.

Наряду с недостатками, нельзя не отметить основное преимущество метода – возможность разностороннего анализа проблем на ранних стадиях (при отсутствии показателей надёжности); к достоинствам можно отнести относительно высокую скорость определения результатов, а также возможность оценивания объекта при невозможности измерить его характеристики количественными объективными методами.

**Результаты применения иерархической процедуры оценивания.** Для выбора очистного оборудования с помощью ИПО сформирована трёхуровневая иерархия: по выбору из трёх альтернатив по шести критериям (рис. 1).

Критерии для выбора очистного оборудования: вероятность снижения степени очистки ( $K_1$ ), затраты на закупку оборудования ( $K_2$ ), вред для окружающей среды ( $K_3$ ), удобство использования ( $K_4$ ), устойчивость к механическому воздействию извне ( $K_5$ ), степень очистки ( $K_6$ ).

Варианты (альтернативы) выбора: «Адсорбер» ( $V_1$ ), «ПХТ» ( $V_2$ ), «Катализ» ( $V_3$ ).

При ИПО получены оценки показателей свойств очистного оборудования, определена весомость этих свойств, а также решающий вектор приоритетов, который наглядно демонстрирует предпочтительность выбора очистного оборудования из сравниваемых. Достоверность полученных результатов подтверждается расчётом обобщённого отношения согласованности. Результаты расчёта компонентов метода представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 следует, что при выборе очистного оборудования от паров  $\text{CH}_2\text{O}_2$ / $\text{CH}_2\text{O}$  рекомендуется принять во внимание вариант  $V_1$ , т. е. «Адсорбер» (адсорбционный метод (технология) очистки воздуха). Достоверность полученных данных применения ИПО подкреплена расчётом обобщённого

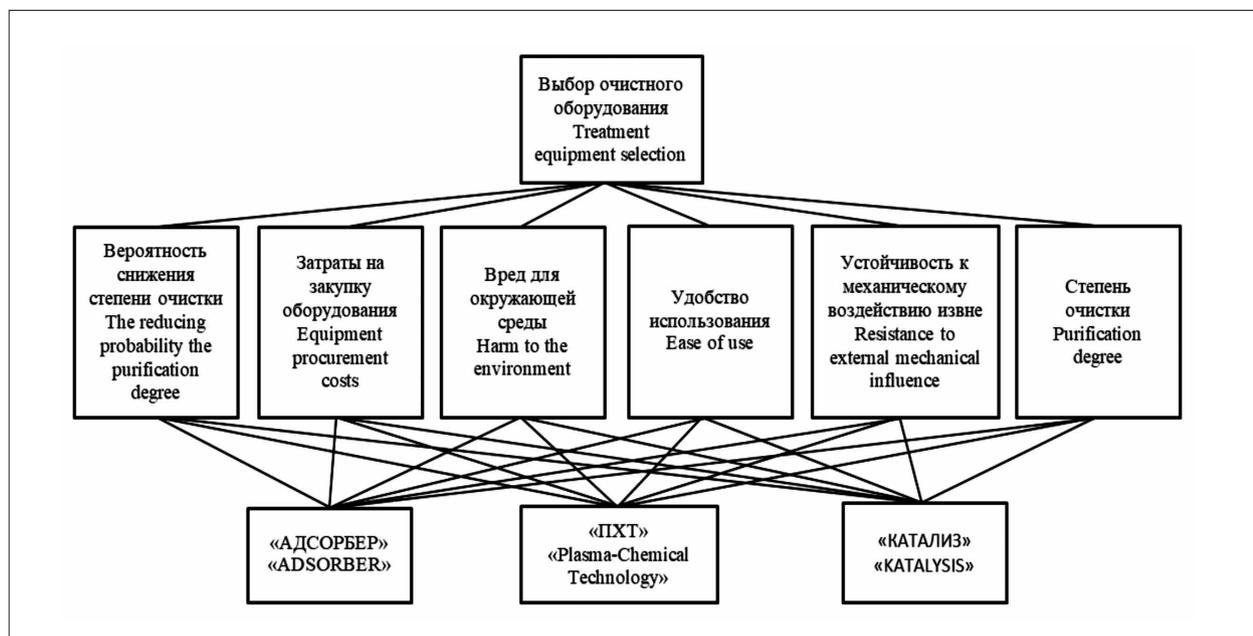


Рис. 1. Иерархия выбора очистного оборудования от паров  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$   
 Fig. 1. Cleaning equipment selection hierarchy from  $\text{CH}_2\text{O}_2$  vapors and  $\text{CH}_2\text{O}$

Таблица 3 / Table 3

Итоговые значения приоритетов выбора очистного оборудования (очистка от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  /  $\text{CH}_2\text{O}$ )  
 Summary values of priorities for the cleaning equipment selection (cleaning from  $\text{CH}_2\text{O}_2$  /  $\text{CH}_2\text{O}$ )

Варианты выбора очистного оборудования Options for choosing cleaning equipment	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	Итоговое значение приоритета при выборе очистного оборудования Summary values of priorities for the cleaning equipment selection
$B_1$	0,08 / 0,10	0,71 / 0,59	0,80 / 0,66	0,12 / 0,60	0,33 / 0,45	0,08 / 0,50	0,375 / 0,413
$B_2$	0,44 / 0,26	0,14 / 0,26	0,14 / 0,20	0,20 / 0,20	0,33 / 0,24	0,44 / 0,26	0,311 / 0,242
$B_3$	0,49 / 0,64	0,14 / 0,16	0,06 / 0,15	0,67 / 0,20	0,33 / 0,31	0,49 / 0,26	0,314 / 0,351

индекса согласованного выбора очистного оборудования (равен 4,1/4,5%) и обобщённого отношения согласованности (7,1/7,8%), значения которых не превышают порог 10–15%, что подтверждает адекватность полученных векторов приоритетности.

Однако результаты выбора отнюдь не очевидны («лучший» вариант «Адсорбер» превосходит «худший» («ПХТ») – всего на 20% (для  $\text{CH}_2\text{O}_2$ )), преимущественно благодаря низким капитальным затратам ( $K_2$ ) и значению вероятного вреда для окружающей среды (отсутствие побочных продуктов реакции,  $K_3$ ).

Следует отметить, что представленный выше метод ИПО имеет некоторые недостатки:

возможный субъективный подход опрашиваемых экспертов (специалистов); неполное (неправильное) понимание поставленного вопроса; неполнота и неоднозначность ответа. Стоит упомянуть о том, что каждый задействованный эксперт (специалист) должен глубоко разбираться в исследуемой тематике, т. к. от него требуется большой объём информации [23, 24]. Но все недостатки метода нивелируются его универсальностью и возможностью применения для решения самых разнообразных задач, а также высокой информативностью благодаря пошаговому анализу каждого критерия.

**Результаты оценки комплексного критерия относительной общей пользы.** Результаты

Таблица 4 / Table 4

Итоговые значения относительной общей пользы оборудования очистки воздуха от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  /  $\text{CH}_2\text{O}$   
The relative total benefits resulting values of  $\text{CH}_2\text{O}_2$  /  $\text{CH}_2\text{O}$  air purification equipment

Метод очистки / Purification method	W
Адсорбция / Adsorption	0,017 / 0,330
ПХТ / Plasma-chemical technology	0,007 / 0,260
Катализ / Catalysis	0,012 / 0,290

Таблица 5 / Table 5

Обобщённые результаты расчётов на основе использованных подходов  
для выбора очистного оборудования / Calculation results for the cleaning equipment selection

Метод Method	Подход (методика) / Approach							
	$\text{CH}_2\text{O}_2$				$\text{CH}_2\text{O}$			
	ЭЭП	ЭП	ИПО	W	ЭЭП	ЭП	ИПО	W
Адсорбционный / Adsorption	-	-	+	+	-	-	+	+
ПХТ / Plasma-chemical technology	+	+	-	-	-	+	-	-
Катализ / Catalysis	-	-	-	-	+	-	-	-

Примечание: + обозначает наиболее подходящий метод очистки согласно применённого подхода; - обозначает метод очистки, уступающий лидеру по используемым показателям.

Note: + denotes the most suitable cleaning method according to the applied approach; - denotes a cleaning method that is inferior to the leader in terms of the indicators used.

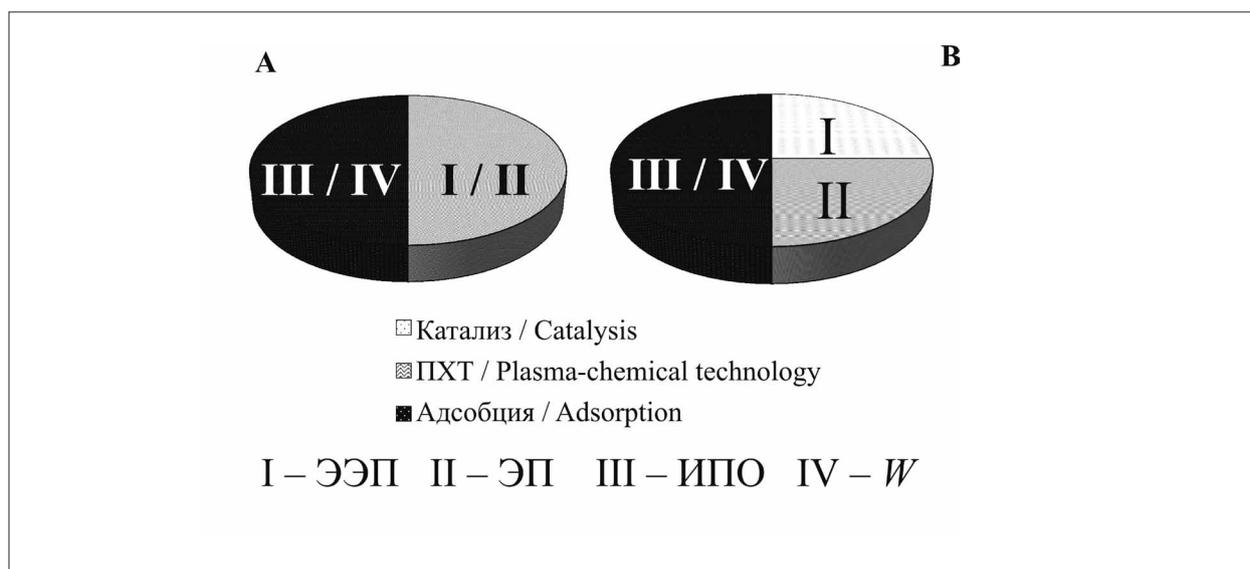


Рис. 2. Наиболее предпочтительные методы очистки воздуха от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  (А) и  $\text{CH}_2\text{O}$  (В) согласно результатам использования различных подходов (табл. 5)

Fig. 2. The most preferred methods for purifying air from  $\text{CH}_2\text{O}_2$  (A) and  $\text{CH}_2\text{O}$  (B) according to the results of using various approaches (Table 5)

оценки интегральной величины, учитывающей величину предотвращённого ущерба от катастрофы, затраты на предотвращение и понижение техногенного риска, а также уровень техногенного риска по методу W, представлены в таблице 4.

Полученные расчёты (табл. 4) показывают, что наилучшим показателем с учётом параметров экологического риска обладает адсорбционный метод/технология, превосходящий ПХТ на 60 и 20% при очистке воздуха от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$  соответственно, преимущественно за

счёт относительно низких затрат энергии для реализации процесса очистки.

Методика, основанная на W, имеет достаточно универсальный характер, что подтверждается её применением в работе [17] при обеспечении экологической безопасности путём выбора наиболее эффективных мер очистки атмосферного воздуха и воды в процессе производства.

Важным достоинством применённого метода является учёт нескольких аспектов эффективности применения оборудования:

Таблица 6 / Table 6

Итоговые данные по оценкам «углеродного следа» для каждого из методов очистки воздуха от 2,5 т  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и 30 т  $\text{CH}_2\text{O}$  / Resulting data on “carbon footprint” estimates for each method of air purification from 2.5 tons of  $\text{CH}_2\text{O}_2$  and 30 tons of  $\text{CH}_2\text{O}$

Углеродный след Carbon footprint	Адсорбция Adsorption	Катализ Catalysis	ПХТ Plasma-chemical technology
по $\text{CH}_2\text{O}_2$ , т $\text{CO}_2$ /год on $\text{CH}_2\text{O}_2$ , t $\text{CO}_2$ / year	2552315	2980485	538556
по $\text{CH}_2\text{O}$ , т $\text{CO}_2$ /год on $\text{CH}_2\text{O}$ , t $\text{CO}_2$ / year	3262229	2156210	375357

экономического и социального (предотвращённый экологический ущерб), а также надёжности. К существенному недостатку относится то, что невозможно воспользоваться методом на этапе проектирования при условии отсутствия данных по показателям надёжности соответствующих очистных устройств.

**Сопоставление расчётных данных.** При проведении оценок с использованием четырёх рассмотренных подходов были получены следующие данные (табл. 5, рис. 2).

В ходе проведения оценок с использованием различных подходов было установлено следующее:

1) на промышленном предприятии для очистки 2,5 т паров муравьиной кислоты возможно применение как адсорбционного оборудования, так и плазменного способов очистки (рис. 2А);

2) сведения, представленные на рисунке 2Б, показывают, что приобретение и применение для очистки адсорбционной установки являются более выгодными по сравнению с каталитической колонкой и плазменно-химическим реактором для удаления 30 т формальдегида, который образуется в процессе получения 250 тыс. м<sup>3</sup> готовой продукции ДСП и ДВП.

Следовательно, результаты оценок при помощи использованных подходов дают отрицательный ответ на вопрос о целесообразности реализации ПХТ в промышленной деятельности (за исключением предприятий, в выбросах которых будет необходимо удалять  $\text{CH}_2\text{O}_2$ ). Однако необходимо рассмотреть ещё дополнительный и актуальный показатель, учитывающий ресурсосбережение, влияние технологии на состояние атмосферы и климата Земли, а также применяемый в последние 2–3 года [9] – «углеродный след».

**Оценка «углеродного следа».** Определение «углеродного следа», в первую очередь, обусловлено политикой в отношении «углерод-

ной нейтральности», поскольку РФ является страной-участником Парижского соглашения «Об изменении климата» [25]. Соответственно, введение «углеродного налога» на территории страны является вопросом времени, и оценка углеродного выброса от эксплуатации различных технологий в таком случае приобретает особую значимость [26, 27]. Отметим, что в работе в качестве представителя «углеродного следа» рассматривается  $\text{CO}_2$ , поскольку вклад данного газа в парниковый эффект наибольший [28]. Результаты оценок «углеродного следа» приведены в таблице 6.

Следовательно, можно сделать следующий вывод: для очистки атмосферного воздуха от 2,5 т  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и 30 т  $\text{CH}_2\text{O}$  наиболее эффективным по показателю «углеродного следа» является ПХТ (табл. 6). Плазменные методы (низкотемпературная плазма, получаемая на установках типа «Ятаган») имеют преимущества относительно адсорбционного и каталитического метода, а именно: более низкие обобщённые затраты на электроэнергию (транспортировка утилизируемого сорбента / катализатора). Кроме того, ПХТ не требует применения сорбентов и катализаторов, на производство которых приходится большой объём выбросов  $\text{CO}_2$ .

Таким образом, в отношении «углеродной нейтральности», ПХТ является более предпочтительным методом в сравнении с упомянутыми технологиями, поскольку предоставляется возможность сократить выбросы  $\text{CO}_2$  практически на порядок. С другой стороны, применение ПХТ, как перспективной технологии, подразумевает сокращение расходов энергии, но, именно по этому показателю данный способ уступает сравниваемым технологиям. По этой причине необходимы исследования по оптимизации ПХТ, и одним из возможных путей является совмещение ПХТ с традиционными и/или перспективными технологиями (в противном случае применение плазменного метода очистки воздуха будет

ограничено практикой, не рассматривающей энергоэффективность как приоритет).

В частности, необходимы дальнейшие исследования для оптимизации применения плазмы барьерного разряда (коронного, стримерного или вообще разрядных систем). Так, интересные возможности представляет плазма барьерного разряда в присутствии катализатора **Cu-Se, снижающая концентрацию** поллютантов не менее чем на 94,7% при начальной концентрации 73 мг/м<sup>3</sup> [29], а при нейтрализации муравьиной кислоты совместно с ароматическими соединениями (бензол, толуол, ксилол) достигается 90% степень превращения органических поллютантов плазменно-каталитическим методом [30]. В целом, оценка количества работ в направлении исследования совмещённых плазменно-каталитических процессов (СПКП) за последнее время позволяет предположить хорошую эколого-экономическую эффективность ПХТ, поскольку может расширить возможности уже используемых технологий очистки воздуха.

### Заключение

Результаты осуществлённых оценок эффективности очистки воздуха от формальдегида и муравьиной кислоты показывают, что на данный момент ПХТ не может быть самостоятельной технологией, как в случае очистки отходящих газов от  $\text{CH}_2\text{O}_2$ , так и  $\text{CH}_2\text{O}$ , поскольку в среднем отстаёт на 30% от сопоставимых традиционных физико-химических методов очистки. Так, например, только два из четырёх способов выбора наиболее предпочтительного метода очистки воздуха от  $\text{CH}_2\text{O}_2$  показывают преимущество данной технологии относительно катализа. При рассмотрении же промышленных технологий удаления  $\text{CH}_2\text{O}$  из воздуха можно констатировать, что ПХТ отстаёт от адсорбционной технологии, поскольку капитальные затраты на реализацию ПХТ и на электроэнергию при эксплуатации оборудования относительно высоки.

Вместе с тем, с точки зрения «углеродной нейтральности» ПХТ для удаления  $\text{CH}_2\text{O}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$  более предпочтительна, она позволяет сократить суммарные выбросы  $\text{CO}_2$  в среднем на 80%, преимущественно за счёт того, что отсутствует необходимость транспортировать утилизируемый сорбент (адсорбционные технологии) или катализатор (катализ). Кроме того, при сравнении с адсорбционным или каталитическим методами можно пренебречь затратами ресурсов на реализацию ПХТ.

Следовательно, снижая эксплуатационные затраты, например, за счёт выбора оптимальных частот электрогенераторов низкотемпературной плазмы, применяя катализаторы в СПКП, внедряя инновационные материалы в конструкцию разрядных ячеек, а также повышая надёжность последних (увеличивая ресурс реакторов ПХТ), можно попытаться достичь и превзойти эффективность традиционных технологий очистки воздуха.

### References

1. Efimov A.E., Bubnov A.G. Air purification from formaldehyde by active barrier discharge particles // Russian Journal of Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.38.44
2. ITS 22-2016 Treatment of emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air during the production of products (goods), as well as during the performance of work and the provision of services at major events. Moskva: Byuro NDT, 2016. 211 p. (in Russian).
3. Pankratov A.N., Uchaeva I.M. Oxidation-reduction reactions in the environment. Moskva: Izdatelstvo "Pero", 2020. 256 p. (in Russian).
4. ITD 47-2023 Treatment (handling) systems for wastewater and exhaust gases in the chemical industry. Moskva, 2023. 102 p. (in Russian).
5. Evsina E.M., Khomenko T.V., Zolotareva N.V. Mathematical modeling of evaluation and the choice of technical solutions in air purification systems // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2019. No. 4 (30). P. 135–140 (in Russian).
6. Evsina E.M., Shikulsky M.I. Intellectualization of the decision support system for the selection of methods and means of air purification of industrial enterprises // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2021. No. 1 (35). P. 66–69 (in Russian).
7. Berezyuk M.V., Romyantseva A.V., Merzlikina Yu.B., Makarova D.N. Choice of the best available technologies: economic aspects // Vestnik UrFU. Seriya Ekonomika i upravlenie. 2014. No. 2. P. 109–121 (in Russian).
8. Berezin S.E., Bazhenov V.I., Chernenko A.V. Justification for the choice of technological equipment for wastewater treatment // Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya. 2014. No. 2. P. 48–59 (in Russian).
9. STO MON 2.42-2018. "Green" standards in the nanoindustry methodology for assessing the carbon footprint of the production of innovative products. Moskva, 2018. 43 p. (in Russian).
10. Begak M.V., Guseva T.V., Molchanova T.V., Averochkin E.M., Sagayduk V.L. Monitoring and reducing the carbon footprint of Russian water utilities. Methods for determining the carbon footprint of wastewater treatment facilities. Moskva: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2013. 56 p. (in Russian).

11. Bykova Ya.P., Ermolenko B.V. Statement of the problem of choosing an effective technological scheme for treating wastewater from oil refineries and constructing a mathematical model // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2007. V. 21. No. 12 (80). P. 7–12 (in Russian).
12. Decree of the Government of the Russian Federation of January 24, 2020. No. 39 “On the application of payment rates for negative environmental impact in 2020” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202001280014?index=1&rangeSize=1> (Accessed: 30.12.2022) (in Russian).
13. Decree of the Government of the Russian Federation of September 13, 2016 No. 913 (as amended on January 24, 2020) “On the rates of payment for the negative impact on the environment and additional coefficients” [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/420375216?ysclid=lcovonu tc9361188670> (Accessed: 30.12.2022) (in Russian).
14. Evstropov N.A. Environmental assessment of the quality level of industrial products and technological processes: guidelines. Moskva: Akademiya standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2001. 44 p. (in Russian).
15. Saati T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. Moskva: Radio i svyaz, 1993. 278 p. (in Russian).
16. Saraev I.V., Bubnov A.G. Choosing personal protective equipment for firefighter respiratory and eye protection based on relative total benefit // *Civil Security Technology*. 2017. V. 14. No. 1 (51). P. 71–79 (in Russian).
17. Bubnov A.G., Grinevich V.I., Gushchin A.A., Platinina N.A. Methodology of method choice for water purification from organic substances applying ecological risk parameters // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2007. V. 50. No. 8. P. 89–93 (in Russian).
18. Dynamics of development of carbon emission factors for electricity generation in Russia. Study of the baseline level of carbon emissions in Russia: final report [Internet resource] [https://www.ebrd.com/downloads/sector/eccc/Baseline\\_Study\\_Russia\\_Final\\_Russian.pdf](https://www.ebrd.com/downloads/sector/eccc/Baseline_Study_Russia_Final_Russian.pdf) (Accessed: 25.04.2022) (in Russian).
19. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation [Internet resource] <http://www.mnr.gov.ru> (Accessed: 25.04.2022) (in Russian).
20. Sedykh V.A., Kurolap S.A., Belyaeva L.N., Mazurov G.I., Kozlov A.T., Zakusilov V.P. Formaldehyde air pollution and risk assessment of carcinogenic effects // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 73–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-073-079
21. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated December 29, 2020 No. 1416 “On approval of the regulatory document in the field of environmental protection “Technological indicators of the best available technologies for the production of basic organic chemicals” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202101290016?ysclid=ls8wwxvr6c782648591> (Accessed: 04.02.2024) (in Russian).
22. Kakareka S.V., Ashurko Yu.G. Peculiarities of formaldehyde into atmospheric air emission from manufacture and use of wood processing production // *Prirodopolzovanie*. 2011. No. 19. P. 31–36 (in Russian).
23. Seredkin K.A., Dolgoshchelova M.I., Korobov V.B., Comparison of methods for expert evaluation of factors in terms of ecological-geographical value of environmental impact assessment of transport infrastructure of Arkhangel'sk region // *Arctic Environmental Research*. 2014. No. 4. P. 43–52 (in Russian).
24. Uzhga-Rebrov O.I., Grabusts P.S. Comparative analysis of two approaches to modeling and accounting for risks in decision making // *Problemy Analiza Riska*. 2012. No. 2. P. 8–23 (in Russian).
25. Paris agreement: Status of ratification / United Nations framework convention on climate change (UNFCCC) [Internet resource] [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9444.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php) (Accessed: 30.12.2022).
26. Syrcina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223
27. Gordeeva E.M., Pugach V.N. The Paris Agreement and “Climate neutrality”: the role for “Agriculture, forestry and other land use” sector // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 219–227 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227
28. Kantor G.Ya., Syrcina 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
29. Zhu X., Gao X., Qin R., Zeng Y., Qu R., Zheng C., Tu X. Plasma-catalytic removal of formaldehyde over Cu–Ce catalysts in a dielectric barrier discharge reactor // *Appl. Catal., B*. 2015. V. 170–171. P. 293–300. doi:10.1016/j.apcatb.2015.01.032
30. Kim H.H., Ogata A., Futamura S. Atmospheric plasma-driven catalysis for the low temperature decomposition of dilute aromatic compounds // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. No. 8. Article No. 1292. doi: 10.1088/0022-3727/38/8/029

## Рациональное использование земельных ресурсов при размещении объектов захоронения твёрдых коммунальных отходов

© 2024. Е. В. Губарь, ассистент,  
О. А. Самарина, к. т. н., доцент,  
О. В. Тупицына, д. т. н., заведующий кафедрой,  
Самарский государственный технический университет,  
443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244,  
e-mail: e.v.gubar@mail.ru

Разработаны критерии оценки экономических, технологических и экологических решений по реализации мероприятий обращения с отходами в отношении объектов, находящихся на инвестиционном этапе своего жизненного цикла. Разработаны научно-методические основы обоснования состава сооружений при проектировании объектов захоронения твёрдых коммунальных отходов (ТКО). Представлена оценка эффективности технологических решений объектов захоронения ТКО при ограничении площади земельного участка. Проведён сравнительный анализ технико-экономических и экологических характеристик строительства полигонов ТКО наиболее распространённого типа (площадь участка складирования отходов 3 га, годовая мощность до 30 тыс. т) для различных конструктивных схем организации – без разбивки на карты эксплуатации и с разбивкой на карты эксплуатации с их поочерёдным строительством. Оценка двух конструктивных схем организации участков складирования отходов основывалась на факторах воздействия на окружающую среду и стоимостных характеристиках строительства полигона ТКО. Полученные показатели позволили не только обосновать целесообразность и оценить экономическую эффективность инвестиций для каждой конструктивной схемы строительства, но и выявить избыточность технологических решений, применение которых привело к значительному увеличению финансовых и временных расходов. Так, вопрос разделения капитальных затрат на годы ввода в эксплуатацию отдельных карт полигонов ТКО с сокращением единовременных затрат в первый год реализации объекта является экономически целесообразным. Однако прогнозные изменения уровней цен на дату реализации каждой карты объекта, увеличение удельной стоимости размещения 1 м<sup>3</sup> отходов и сокращение массы отходов, захораниваемых на 1 га, ставят под сомнение экономическую выгоду единовременного сокращения капитальных затрат.

**Ключевые слова:** рациональное использование земельных ресурсов, геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов, нормирование в области геоэкологических аспектов природопользования.

## Rational use of land resources in the placement of municipal solid waste disposal facilities

© 2024. E. V. Gubar ORCID: 0000-0003-0040-9466\*  
O. A. Samarina ORCID: 0009-0007-3935-6329\*  
O. V. Tupicina ORCID: 0000-0003-0638-2700\*  
Samara State Technical University,  
244, Molodogvardeyskaya St., Samara, Russia, 443100,  
e-mail: e.v.gubar@mail.ru

Within the framework of this article the criteria for assessment of economic, technological and environmental solutions for realization of waste management measures in respect of the objects, which are at the investment stage of their life cycle, are developed. The scientific and methodological foundations for substantiating the composition of structures in the design of municipal solid waste disposal facilities have been developed. The efficiency assessment of technological solutions of solid waste disposal facilities under the restriction of land plot area is presented. A comparative analysis of technical, economic and environmental characteristics of construction of the most common type of landfills (waste disposal area of 3 ha, annual capacity up to 30 thousand tons) for different structural schemes of organization – without breakdown into operation maps and with breakdown into operation maps with their turn-by-turn construction. The assessment of two constructive schemes of organization of waste disposal sites was based on the factors of environmental impact and cost characteristics of landfill construction. The obtained indicators allowed not only to justify the feasibility and assess the economic efficiency of investments for each construction scheme, but also to identify the redundancy of technological solutions, the use of which led to a significant increase in financial and time costs. Thus, the issue of dividing

capital costs into years of commissioning of individual maps of landfills with reduction of one-time costs in the first year of object realization is economically feasible. However, forecast changes in price levels on the date of implementation of each map of the facility, increase in the unit cost of disposal of 1 m<sup>3</sup> of waste and reduction in the mass of waste buried on 1 hectare, cast doubt on the economic benefit of a one-time reduction in capital costs.

**Keywords:** rational use of land resources, geocological aspects of sustainable development of regions, regulation in the field of geocological aspects of environmental management.

Управление объектами обращения с отходами как сложными природно-техническими системами (ПТС) с целью обеспечения рационального природопользования и их устойчивого развития выступает в качестве комплексной проблемы экологической безопасности регионов, решение которой должно рассматриваться в рамках единой эколого-экономической системы, объединяющей взаимосвязанные социальные, экономические и природные процессы [1].

Низкий уровень извлечения утильных фракций из потока твёрдых коммунальных отходов (ТКО), как на этапе образования, так и на этапе их обработки на мусоросортировочных станциях, и существующие на сегодняшний день объективные ограничения повсеместного внедрения известных технологий утилизации ТКО (например, методами сжигания, компостирования, пиролиза) становятся наиболее распространёнными причинами захоронения более 90% всех образующихся ТКО [2].

Полигоны ТКО представляют собой сложные ПТС, инженерная инфраструктура которых обеспечивает складирование и захоронение ТКО. Оценка (аудит) мероприятий по строительству таких ПТС должна осуществляться с использованием технико-экономических показателей – измерителей эффективности выполнения строительно-монтажных работ, определяющих лимит капитальных вложений, соответствие технологических и технических решений нормативно-правовым актам, избыточность проектных решений. На сегодняшний день определение технико-экономических показателей строительства полигонов ТКО не закреплено законодательно, также не определён их необходимый и достаточный состав.

Технико-экономические показатели, определяющие затраты на строительство полигонов ТКО, должны быть разработаны на основе современных экономических и инженерных расчётов. Практическое отсутствие производственных и плановых нормативов строительства полигонов ТКО значительно повышает роль сметных норм [3].

Цель настоящего исследования – разработка и обоснование необходимого и достаточного

набора технико-экономических и экологических показателей с целью оценки прогнозных сценариев эколого-экономического обоснования создания объектов захоронения ТКО.

### Объекты и методы исследования

Известно, что для объектов обращения с отходами выделяют четыре основных этапа жизненного цикла: инвестиционный, эксплуатационный, рекультивационный и пострекультивационный [4].

В соответствии с целью настоящего исследования критерии оценки экономических, технологических и экологических параметров для строительства полигонов ТКО разработаны в отношении объектов, находящихся на этапе осуществления инвестиций.

С учётом действующего законодательства инвестиционный этап включает в себя: выбор земельного участка размещения объекта в соответствии с требованиями действующих нормативно-правовых актов РФ; проведение инженерных изысканий для подготовки проектно-сметной документации; разработку проектно-сметной документации; прохождение государственных экологической и строительной экспертиз проектно-сметной документации и результатов инженерных изысканий; строительство инженерных и природоохранных сооружений.

Предварительная оценка структуры и величины стоимости работ показала, что стоимость земляных работ достигает 30% в общем объёме затрат на выполнение работ по строительству полигонов ТКО. При этом данные виды работ наиболее трудоёмки и определяются природно-климатическими и инфраструктурными особенностями участка расположения объекта строительства.

К земляным работам относятся работы по выемке грунта, его дальнейшей транспортировке и/или перемещению, а также по созданию временных или постоянных земляных сооружений, к которым относятся траншеи для укладки инженерных коммуникаций и фундаменты.

Конструктивная схема организации участков складирования может включать единую

карту захоронения ТКО или несколько обособленных технологических карт, которые последовательно строятся и вводятся в эксплуатацию. При участии бюджетного финансирования инвестиционных объектов вопрос разделения капитальных затрат на годы ввода в эксплуатацию отдельных карт полигонов ТКО с сокращением единовременных затрат в первый год реализации объекта является экономически целесообразным. Однако прогнозные изменения уровней цен на дату реализации каждой карты объекта и увеличение удельной стоимости размещения  $1 \text{ м}^3$  отходов ставят экономическую выгоду единовременного сокращения капитальных затрат под сомнение [5, 6].

С учётом актуальности вопроса, на сегодняшний день требуется критериальная оценка целесообразности и обоснованности выбора в технологических решениях применения либо отказа картирования участка захоронения ТКО. В рамках проведённого исследования оценку предлагается выполнять на основе технико-экономических показателей объекта захоронения ТКО.

Анализ территориальных схем в области обращения с отходами регионов Приволжского федерального округа показал, что наиболее распространённым типом объектов, планируемых к реализации, является полигон размещения отходов мощностью до 30 тыс. т в год на участке складирования площадью до 3 га.

Данный тип объектов выбран в качестве объекта исследования, в отношении которого проведена разработка технико-экономических показателей в условиях различных конструктивных схем организации участков складирования: без разбивки на карты эксплуатации и с разбивкой на карты эксплуатации с их поочерёдным строительством.

В качестве основных исходных данных при проведении комплексной оценки использованы общие сведения о районе проектирования, данные для расчёта объёмов земляных работ и способ производства земляных работ (табл. 1).

Технико-экономические показатели и стоимость работ по строительству полигонов ТКО рассчитаны для различных технологических решений карт захоронения отходов (рис. 1, 2) в уровне цен I квартала 2023 г. на основании сборников единичных расценок, являющихся составной частью системы ценообразования и сметного нормирования в строительстве, действующих на территории РФ. Технические и технологические решения

полигонов ТКО соответствуют действующим нормативно-правовым актам (Федеральному закону от 24.06.1998 г. № 89-ФЗ, Постановлению Правительства РФ от 12.10.2020 г. № 1657, СП 320.1325800.2017 (изм. 1), ИТС НДТ 17-2021). Для расчёта картограммы земляных масс использован программный комплекс GeoniCS 2015.

Проведённая оценка предусматривает учёт стоимости работ по разработке траншей и котлованов одноковшовым экскаватором с ёмкостью ковша 0,25–1,0 м со складированием грунта в отвал для обратной засыпки. Обратная засыпка выполняется бульдозером, с послыйным уплотнением пневмотрамбовками. Устройство участка захоронения отходов, пруда-накопителя, участка хранения грунта выполняется экскавацией котлована с помощью спецтехники и транспортировкой грунта автотранспортом. Устройство гидроизоляционной мембраны на дне и откосах котлована выполняется вручную, защитные слои грунта подаются экскаватором с окончательным разравниванием вручную [7, 8]. Создание траншей для прокладки электрокабеля, трубопроводов производится с помощью экскаватора. Укладка кабеля в траншею производится сматыванием с барабана вручную. Монтаж трубопроводов выполняется с применением автокрана. При устройстве внутриплощадочной дороги уплотнение грунта производится катками. Отсыпка основания из песка, щебня выполняется автотранспортом, с уплотнением катками. Устройство покрытия из асфальтобетонной смеси выполняется с помощью асфальтоукладчика.

### Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования и оценки выбран комбинированный тип полигона ТКО – карьерный полигон ТКО с последующим образованием насыпи. На рисунке 3 представлена укрупнённая схема данного типа полигона ТКО с конструктивной схемой организации участков складирования без разбивки на карты эксплуатации.

Рисунок 4 демонстрирует технологическое решение конструкции участка захоронения полигона ТКО комбинированного типа с разбивкой на карты эксплуатации с их поочерёдным строительством.

Многофункциональные комплексы по обращению с отходами включают в себя здания и сооружения, специализированное технологическое оборудование по обработке, утилизации

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры объекта исследования / Main parameters of the research object

Показатель / Indicator	Значение / Significance
Мощность, тыс. т/год / Capacity, thousand tons/year	<30
Площадь земельного участка, га / Land area, ha	6,55
Площадь участка захоронения, га Area of the burial site, ha	3,00
Плотность неуплотнённых отходов, т/м <sup>3</sup> Density of uncompacted waste, t/m <sup>3</sup>	0,60–0,65
Плотность уплотнённых отходов, т/м <sup>3</sup> Density of compacted waste, t/m <sup>3</sup>	1,10–1,30
Высота ярусов складирования ТКО, м Height of MSW storage tiers, m	<2,5
Толщина слоя санитарной засыпки, м Thickness of the sanitary backfill layer, m	0,15
Минимальный уклон планировки Minimum planning slope	0,005
Расчётный автомобиль Calculation vehicle	Scania P360 с габаритными размерами 9,21×2,48 м, высотой 3,5 м Scania P360 with overall dimensions 9.21×2.48 m, height 3.5 m
Климатический район (подрайон) для строительства (СП 131.13330.2018) / Climatic region (subdistrict) for construction (SP 131.13330.2018)	IV
Снеговой район (табл. 10.1 СП 20.13330.2016) Snow region (Table 10.1 SP 20.13330.2016)	III
Ветровой район (СП 20.13330.2016) Wind region (SP 20.13330.2016)	III
Номер гололёдного района (СП 20.13330.2016) Number of the icy area (SP 20.13330.2016)	II
Сейсмическая активность, баллов Seismic activity, points	5
Глубина залегания подземных вод, м Depth of groundwater, m	5,0–7,0
Грунты на участке работ / Soils at the work site	среднепучинистые / medium heaving

и обезвреживанию отходов, обеспечивающие технологически непрерывное и максимально возможное выделение утильных фракций с последующим захоронением не утилизируемых фракций. Техническим параметром объекта исследования является набор основных и вспомогательных сооружений, обслуживающих эксплуатацию многофункциональных комплексов по обращению с отходами.

Основные элементы анализируемых полигонов ТКО включают в себя участок захоронения ТКО, очистные сооружения, административно-хозяйственную зону, внутриплощадочные проезды и подъездную дорогу, соединяющую существующую магистраль с полигоном [9].

Согласно требованиям Федерального закона «Об отходах производства и потребления» и Градостроительного кодекса РФ запрещает-

ся ввод в эксплуатацию объектов обращения с отходами, не оснащённых техническими средствами и технологиями обезвреживания и безопасного размещения отходов.

Свод правил «Полигоны твердых коммунальных отходов. Проектирование, эксплуатация и рекультивация» (СП 320.1325800.2017 с учётом изменения № 1) распространяется на проектирование, эксплуатацию и рекультивацию полигонов ТКО. Разделы 4 и 6 СП 320.1325800.2017 содержат основные правила проектирования строительных конструкций зданий и сооружений, обеспечивающих экологическую безопасность полигонов ТКО.

Постановление Правительства РФ от 12.10.2020 г. № 1657 предусматривает единые требования к объектам обработки, утилизации, обезвреживания, размещения ТКО, в соответствии с которыми проектная докумен-

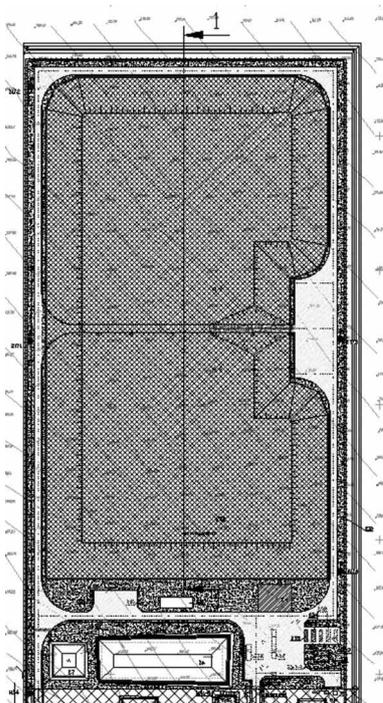


Рис. 1. Генеральный план объекта без разбивки на карты эксплуатации  
 Fig. 1. General plan of the facility without breakdown into operation maps

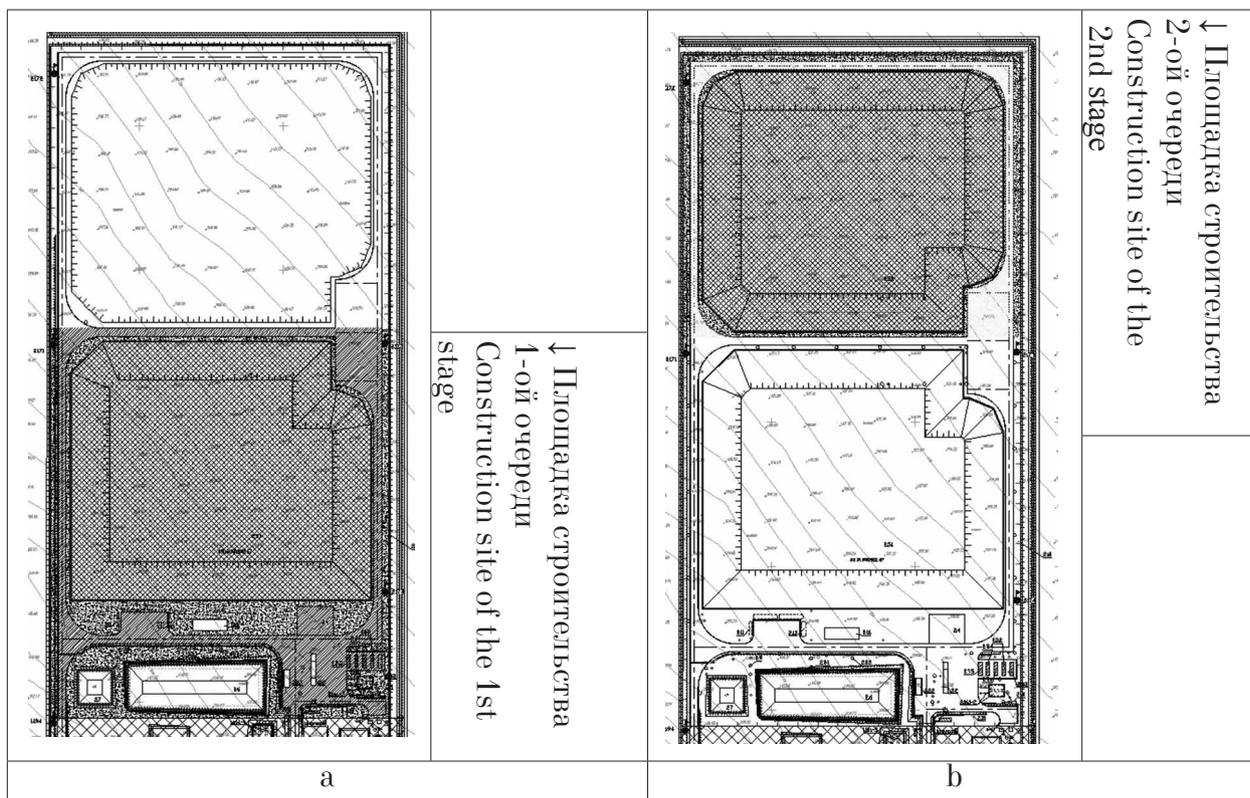
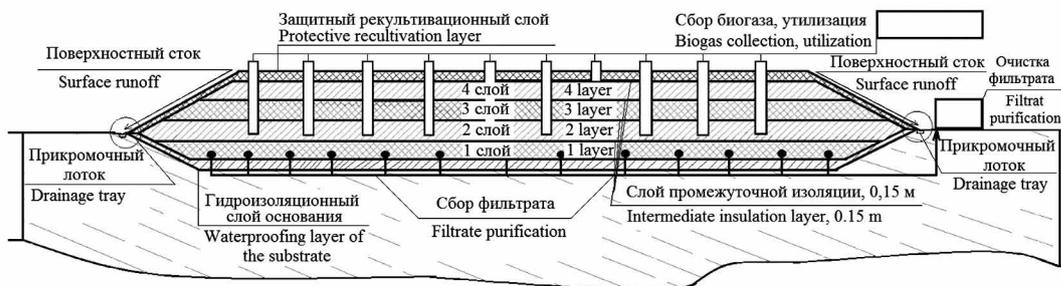
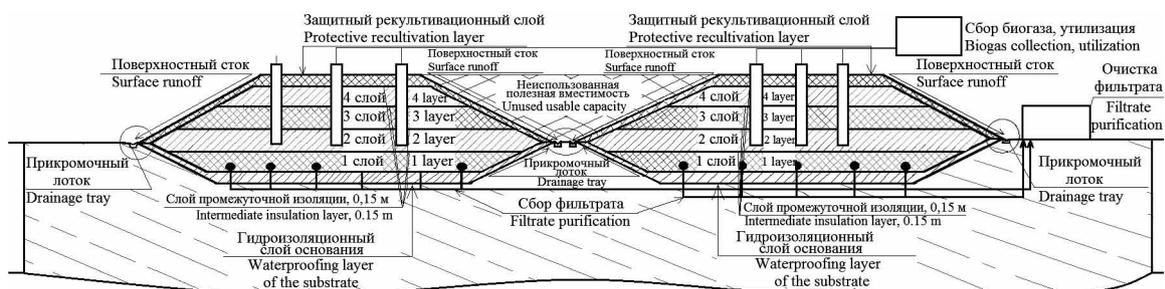


Рис. 2. Генеральный план объекта с разбивкой на карты эксплуатации с их поочерёдным строительством: а) устройство карты захоронения отходов 1-ой очереди эксплуатации; б) устройство карты захоронения отходов 2-ой очереди эксплуатации  
 Fig. 2. General plan of the facility broken down into operation maps with their sequential construction: a) construction of a waste disposal map 1st stage of operation; b) construction of a waste disposal map 2nd stage of operation



**Рис. 3.** Технологическое решение конструкции участка захоронения полигона ТКО комбинированного типа (карьер с насыпью) без разбивки на карты эксплуатации  
**Fig. 3.** Technological solution for the design of a combined type MSW landfill site (quarry with embankment) without breakdown into operation maps



**Рис. 4.** Технологическое решение конструкции участка захоронения полигона ТКО комбинированного типа (карьер с насыпью) с разбивкой на карты эксплуатации  
**Fig. 4.** Technological solution for the design of a combined type MSW landfill site (quarry with embankment) broken down into operation maps

тация полигонов ТКО должна предполагать полный объём мероприятий по охране окружающей среды [10].

Данные таблицы 2 подтверждают соответствие состава природоохранных сооружений объекта исследования требованиям конкретных пунктов действующих нормативно-правовых актов.

Результаты определения стоимости строительства каждого из двух вариантов полигонов ТКО представлены в таблице 3.

Выбор реализации одной из двух конструктивных схем организации участков складирования отходов должен основываться как на экологических, так и на технико-экономических показателях строительства полигона ТКО.

Результатом исследования являются определение такого технико-экономического показателя, как удельная стоимость 1 м<sup>3</sup> полезной вместимости полигона ТКО с ежегодной мощностью до 30 тыс. т. Стоимость строительства каждого из объектов определена в результате составления сводных сметных расчётов, учитывающих точные расходы на выполнение комплекса работ, необходимых

для введения полигонов ТКО в эксплуатацию. Помимо строительно-монтажных работ, стоимости материально-технических ресурсов и оборудования, учтены затраты на проведение инженерно-экологических изысканий, разработку проектно-сметной и рабочей документации, проведение государственных экспертиз (строительной и экологической), пусконаладочные работы и прочие затраты (технологическое присоединение к сетям инженерно-технического обеспечения, средства на строительство и разборку титульных временных зданий и сооружений, затраты на выполнение мониторинга компонентов окружающей среды в процессе выполнения строительных работ и др.). Для варианта 2 – полигона ТКО с разбивкой на карты эксплуатации с их поочерёдным строительством, предполагаемая стоимость строительства второй карты полигона ТКО в 2029 г. определена при помощи прогнозных индексов-дефляторов, разработанных Минэкономразвития России [11].

Изъятие земельных участков в целях строительства полигонов ТКО является негативным экологическим фактором. В результате протекания различных биохимических,

Состав инженерных и природоохранных сооружений полигонов ТКО  
Composition of engineering and environmental structures of MSW landfills

Состав сооружений Composition of structures	Нормативно-правовые акты Regulations	
		Постановление Правительства РФ от 12.10.2020 г. № 1657 Decree of the Government of the Russian Federation dated October 12, 2020. No. 1657
Производственная зона: / Production area:		
Участок захоронения отходов IV и V классов опасности – «тело» полигона мощностью до 30 тыс. т/год The disposal site for waste of hazard classes IV and V is the “body” of the landfill with a capacity of up to 30 thousand t/year		раздел 4, п.п. 4.10; раздел 6, п.п. 6.4, 6.6 chapter 4, p.p. 4.10; chapter 6, p.p. 6.4, 6.6
Участок хранения минерального грунта из расчёта месячной потребности (30 дней) технологической изоляции рабочих карт Mineral soil storage area based on the monthly requirement (30 days) of technological isolation of working cards		раздел 4, п.п. 4.10 chapter 4, p.p. 4.10
Вспомогательная (хозяйственная) зона: / Auxiliary (household) zone:		
Объекты подсобного и обслуживающего хозяйства: – вагон-дом «Контрольно-пропускной пункт радиационного и весового контроля»; – весовая; – дезинфицирующая ванна; – вагон-дом «Раздевалка с душевой»; – вагон-дом «Комната приёма пищи»; – биотуалет; – резервуар для хранения противопожарного запаса воды; – мониторинговые скважины Utility and service facilities: – car-house “Checkpoint for radiation and weight control”; – weight; – disinfectant bath; – car-house “Locker room with shower”; – carriage house “Meal room”; – dry closet; – a tank for storing fire-fighting water; – monitoring wells	пп. 28, 29, 30 p.p. 28, 29, 30	раздел 4, п.п. 4.7, 4.9, 4.10; раздел 6, п.п. 6.5, 6.9, 6.12, 6.14, 6.15 chapter 4, p.p. 4.7, 4.9, 4.10; chapter 6, p.p. 6.5, 6.9, 6.12, 6.14, 6.15
Объекты энергетического хозяйства Energy facilities		раздел 4, п.п. 4.10; раздел 6, п.п. 6.3, 6.13; п. 8 chapter 4, p.p. 4.10; chapter 6, p.p. 6.3, 6.13; p. 8

Состав сооружений Composition of structures	Нормативно-правовые акты Regulations	
	Постановление Правительства РФ от 12.10.2020 г. № 1657 Decree of the Government of the Russian Federation dated October 12, 2020. No. 1657	СП 320.1325800.2017 SP 320.1325800.2017
<p>Наружные сети и сооружения водоснабжения, водоотведения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– пруд-накопитель фильтрата;</li> <li>– пруд-накопитель поверхностных сточных вод;</li> <li>– канализационная насосная станция (КНС) фильтрата;</li> <li>– КНС поверхностных сточных вод;</li> <li>– станция очистки фильтрата;</li> <li>– очистные сооружения поверхностных сточных вод;</li> <li>– резервуар-накопитель очищенных сточных вод;</li> <li>– резервуар-накопитель концентрата</li> </ul> <p>External networks and structures of water supply and sanitation:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– leachate storage pond;</li> <li>– storage pond for surface wastewater;</li> <li>– sewage pumping station (SPS) for filtrate;</li> <li>– SPS of surface wastewater;</li> <li>– filtrate purification station;</li> <li>– treatment facilities for surface wastewater;</li> <li>– storage tank for treated wastewater;</li> <li>– concentrate storage tank</li> </ul>	<p>пп. 27 р.п. 27</p>	<p>раздел 4, п.п. 4.10; раздел 6, п.п. 6.3, 6.4, 6.7, 6.10, 6.16 chapter 4, p.p. 4.10; chapter 6, p.p. 6.3, 6.4, 6.7, 6.10, 6.16</p>

химических и физических процессов в толще полигона образуются значительные объёмы биогаза и фильтрата [12]. Одновременно с этим нерациональное использование территорий, выделенных для строительства полигонов ТКО, становится причиной их преждевременного заполнения, что приводит к необходимости изъятия дополнительных земельных участков под аналогичные объекты. На сегодняшний день разработаны и на законодательном уровне закреплены технологии и природоохранные мероприятия, обеспечивающие минимизацию антропогенного воздействия полигонов ТКО на компоненты окружающей среды. С целью оценки полезной эксплуатации единицы площади в данной работе предложены показатели экологической эффективности использования изымаемого земельного участка.

Данные таблицы 3 подтверждают влияние последовательного введения в эксплуатацию очередей (этапов) участков захоронения отходов на стоимостные технико-экономические и экологические показатели и вместимость объекта.

### Выводы

Сравнительный анализ основных технико-экономических и экологических показателей строительства объектов по различным схемам в разрезе прогнозного изменения уровня цен на дату строительства объекта позволил сделать следующие выводы:

- возможность сокращения величины финансовых капитальных затрат при различных конструктивных схемах организации участков складирования отсутствует;

- единовременное сокращение капитальных затрат в первый год строительства объекта путём реализации участка захоронения по картам приводит к увеличению удельной стоимости единицы объёма полезной вместимости полигона ТКО до 45%, что негативно отражается на тарифе объекта захоронения отходов и региональной политике обращения с ТКО;

- увеличение стоимости единицы объёма полезной вместимости полигона ТКО с разбивкой на карты эксплуатации является

**Таблица 3 / Table 3**

Сравнительный анализ основных технико-экономических и экологических показателей строительства полигонов ТКО / Comparative analysis of the main technical, economic and environmental indicators of the construction of solid waste landfills

Показатель Indicator	Значение / Significance	
	1 вариант единый участок захоронения 1 Option single burial site	2 вариант карты складирования Option 2 storage cards
Предполагаемый год ввода в эксплуатацию, год Estimated year of commissioning, year	единовременно 2023 год lump sum 2023	последовательно в 2023 и 2029 гг. соответственно successively in 2023 and 2029
Стоимость строительства объекта при единовременной схеме строительства в ценах 1 кв. 2023 г., тыс. руб. The cost of building a facility with a one-time construction scheme in prices of 1 sq. 2023, thousand rubles	481 160,00	471 633,03 (↓ 1,98%)
Предполагаемая общая стоимость строительства объекта при последовательной схеме строительства с учётом индексов дефляторов (тыс. руб.), в том числе: Estimated total cost of construction of the facility with a sequential construction scheme, taking into account deflator indices (thousand rubles), including:	481 160,00	572 051,12 (↑ 18,89%)
– в 2023 году, тыс. руб. – in 2023, thousand rubles	481 160,00	358 818,41
– в 2029 году, тыс. руб. – in 2029, thousand rubles		213 232,71
Вместимость объекта, м <sup>3</sup> Facility capacity, m <sup>3</sup>	367 426,00	298 019,23 (↓ 18,89%)
Вместимость объекта, т Facility capacity, t	477 653,80	387 425,00 (↓ 18,89%)
Удельная стоимость 1 м <sup>3</sup> полезной вместимости объекта, руб./м <sup>3</sup> Specific cost of 1 m <sup>3</sup> of useful capacity of the facility, rub./m <sup>3</sup>	1 309,54	1 919,51 (↑ 46,58%)
Масса отходов, захораниваемых на 1 га, т/га The mass of waste buried per 1 ha, t/ha	159 217,93	129 141,67
Площадь, требуемая для захоронения 1 т отходов, м <sup>2</sup> The area required for the disposal of 1 ton of waste, m <sup>2</sup>	0,063	0,077

следствием сокращения вместимости объекта в 1,2 раза (рис. 4);

– сокращение массы отходов, захораниваемых на 1 га, и увеличение площади, требуемой для захоронения 1 т отходов, демонстрирует нерациональное использование площади выделенного земельного участка в случае поочерёдного строительства отдельных карт полигонов ТКО.

**Литература**

1. Тупицына О.В., Чертес К.Л., Быков Д.Е. Освоение природно-техногенных систем градопромышленных

агломераций. Самара: Изд-во ООО «Издательство Ас Гард», 2014. 336 с.

2. Середа Т.Г., Файзрахманов Р.А., Костарев С.Н. Научно-технические технологии в проектировании искусственных экосистем хранения отходов. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006. 290 с.

3. Губарь Е.В., Тупицына О.В. Разработка финансово-экономических моделей объектов обращения с ТКО на территории Приволжского федерального округа // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского горного университета, 2023. С. 393–395.

4. Быков Д.Е., Тупицына О.В., Чертес К.Л. Рекультивация массива органико-минеральных отходов. Самара: Изд-во Самарск. гос. тех. ун-та, 2007. 118 с.
5. Середя Т.Г., Костарев С.Н., Кочин Ю.А., Кочина Т.В. Моделирование ресурсосберегающего обращения с твердыми коммунальными отходами // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2023. № 1 (24). С. 95–104. doi: 10.36622/VSTU.2023.24.1.011
6. Левин Е.В., Сагитов Р.Ф., Гамм Т.А., Шабанова С.В., Баширов В.Д. Экологическое обоснование места размещения полигона твердых бытовых отходов // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2016. № 3 (59). С. 182–184.
7. Елсаков В.В., Лаптева Е.М., Василевич М.И., Габова Е.В., Каверин Д.А., Кочанов С.К., Панюкова Е.В., Митюшева Т.П., Пыстина Т.Н., Семёнова Н.А., Тихонова Т.В. Обоснование потенциальных рисков размещения полигона твердых коммунальных отходов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 4. С. 72–79. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-072-079
8. Воронкова Т.Б., Чудинов С.Ю. Теоретические аспекты водного баланса полигонов захоронения твердых бытовых отходов с системой рециркуляции фильтрата // *Теоретическая и прикладная экология*. 2013. № 1. С. 13–16. doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-013-016
9. Кантор Г.Я., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Моделирование углеродного баланса полигонов твердых коммунальных отходов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 1. С. 198–204. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204
10. Челябинова Е.Ю., Курбатова А.И. Современные подходы к проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов твердых коммунальных отходов // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2018. № 7 (73). С. 35–38. doi: 10.23670/IRJ.2018.73.7.006
11. Письмо Минэкономразвития России № 35312-ПК/Д03 и от 28 сентября 2023 г. «О доведении показателей прогноза социально-экономического развития Российской Федерации, используемых в целях ценообразования на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу» [Электронный ресурс] [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/pismo\\_minekonomrazvitiya\\_rossii\\_35312\\_pkd03i\\_ot\\_28\\_sentyabrya\\_2023.html?ysclid=lod916c8uz834586072](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/pismo_minekonomrazvitiya_rossii_35312_pkd03i_ot_28_sentyabrya_2023.html?ysclid=lod916c8uz834586072) (Дата обращения: 30.06.2023).
12. Чудакова А.В. Правовые и экологические аспекты предоставления земельных участков под полигоны ТБО // *Науки о Земле: вчера, сегодня, завтра: материалы IV Международной научной конференции, Казань, 20–23 мая 2018 года*. Казань: Изд-во ООО «Издательство Молодой ученый», 2018. С. 6–9.
2. Sereda T.G., Fayzrakhmanov R.A., Kostarev S.N. High-tech technologies in the design of artificial waste storage ecosystems. Perm: PNRPU, 2006. 290 p. (in Russian).
3. Gubar E.V., Tupicina O.V. Development of financial and economic models of MSW treatment facilities on the territory of the Volga Federal District // *Actual problems of subsoil use: tezisy докладov uchastnikov XIX Mezhdunarodnogo foruma-konkursa studentov i molodykh uchenykh, Sankt-Peterburg, 21–27 maya 2023 goda*. Sankt-Peterburg: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo gornogo universiteta, 2023. P. 393–395 (in Russian).
4. Bykov D.E., Tupicina O.V., Chertes K.L. Reclamation of an array of organo-mineral waste. Samara: Samara State Technical University, 2007. 118 p. (in Russian).
5. Sereda T.G., Kostarev S.N., Kochinov Yu.A., Kochinova T.V. Modeling of resource-saving treatment of solid municipal waste // *Housing and communal infrastructure*. 2023. No. 1 (24). P. 95–104 (in Russian). doi: 10.36622/VSTU.2023.24.1.011
6. Levin E.V., Sagitov R.F., Gamm T.A., Shabanova S.V., Bashirov V.D. Ecological justification of the location of a solid waste landfill // *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*. 2016. No. 3 (59). P. 182–184 (in Russian).
7. Elsakov V.V., Lapteva E.M., Vasilevich M.I., Gabova E.V., Kaverin D.A., Kochanov S.K., Panyukova E.V., Mityusheva T.P., Pystina T.N., Semenova N.A., Tikhonova T.V. Justification of potential risks of placing a landfill of solid municipal waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 72–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-072-079
8. Voronkova T.B., Chudinov S.Yu. Theoretical aspects of the water balance of landfills for solid household waste disposal with a filtrate recycling system // *Theoretical and Applied Ecology*. 2013. No. 1. P. 13–16 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2013-1-013-016
9. Kantor G.Ya., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. Carbon balance modeling of municipal solid waste landfills // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 198–204 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204
10. Chelyadinova E.Yu., Kurbatova A.I. Modern approaches to designing, operation, and reconstruction // *International Journal of Science and Research*. 2018. No. 7 (73). P. 35–38 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2018.73.7.006
11. Letter of the Ministry of Economic Development of Russia No. 35312-PK/D03i dated September 28, 2023 “On the communication of forecast indicators for the socio-economic development of the Russian Federation, used for pricing purposes for products supplied under the state defense order” [Internet resource] [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/pismo\\_minekonomrazvitiya\\_rossii\\_35312\\_pkd03i\\_ot\\_28\\_sentyabrya\\_2023.html?ysclid=lod916c8uz834586072](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/pismo_minekonomrazvitiya_rossii_35312_pkd03i_ot_28_sentyabrya_2023.html?ysclid=lod916c8uz834586072) (Accessed: 30.06.2023).
12. Chudakova A.V. Legal and environmental aspects of the provision of land plots for landfills // *Earth Sciences: yesterday, today, tomorrow: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Kazan, 20–23 maya 2018 goda*. Kazan: Izd-vo ООО “Izdatelstvo Molodoy uchenyy”, 2018. P. 6–9 (in Russian).

## References

1. Tupicina O.V., Chertes K.L., Bykov D.E. Development of natural and man-made systems of urban industrial agglomerations. Samara: As Gard Publishing House LLC, 2014. 336 p. (in Russian).

## Таксономическая структура флоры водоёмов, находящихся в зоне влияния лесопромышленного комплекса АО «СЛПК» (Республика Коми)

© 2024. Б. Ю. Тетерюк, к. б. н., с. н. с., А. А. Паниюков, аспирант,  
Е. М. Лаптева, к. б. н., зав. отделом, Р. Р. Рафиков, к. б. н., н. с.,  
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: b\_teteryuk@komisc.ru

Выполнен анализ таксономической структуры флоры водных объектов, находящихся в зоне влияния крупнейшего на Европейском Северо-Востоке России лесопромышленного предприятия – АО «СЛПК». Флора импактных водоёмов в зоне влияния АО «СЛПК» объединяет 119 видов макрофитов, относящихся к 77 родам и 43 семействам. Установлено, что во флорах импактных водоёмов значительно снижена роль семейства Potamogetonaceae и рода *Potamogeton* при одновременном увеличении роли семейств Asteraceae и Poaceae. Флоры водоёмов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК», имеют высокую степень трансформированности: флора антропогенных водоёмов на 100% составлена синантропными видами. Наиболее активные среди них *Bidens cernua* L., *Bidens tripartita* L., *Lycopus europaeus* L. и *Typha latifolia* L. Флоры антропогенно-трансформированных водоёмов также значительно синантропизированы ( $I_s=98,4-100,0\%$ ), их основу составляют апофиты. В антропогенных водоёмах полностью отсутствуют сосудистые споровые и мохообразные растения. Таксономическая структура флор антропогенно-трансформированных водоёмов сохраняет черты сходства с флорой водоёмов региона. В составе анализируемых флор присутствуют охраняемые на территории Республики Коми виды: *Riccia cavernosa* Hoffm. и *Carex pseudocyperus* L.

**Ключевые слова:** флора водоёмов, синантропизация.

## Taxonomic structure of the flora of water bodies located in the zone of influence of the JSC “SLPC” (Komi Republic)

© 2024. B. Yu. Teteryuk <sup>ORCID: 0000-0002-7207-9956</sup>, A. A. Panyukov <sup>ORCID: 0000-0002-9325-0601</sup>,  
E. M. Lapteva <sup>ORCID: 0000-0002-9396-7979</sup>, R. R. Rafikov <sup>ORCID: 0000-0002-8191-3084</sup>,  
Institute of Biology of the Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: b\_teteryuk@komisc.ru

The analysis of the taxonomic structure of the flora of water bodies located in the zone of influence of the largest forestry enterprise in the European North-East of Russia – joint stock company (JSC) “SLPC”. The flora of impact reservoirs in the zone of influence of JSC “SLPC” unites 119 species of macrophytes belonging to 77 genera and 43 families. Flowering plants in its composition are represented by 114 species, and cryptogamic ones by five: vascular spore plants by two, bryophytes by three. It was found that the role of the Potamogetonaceae family and the genus *Potamogeton* was significantly reduced in the floras of impact reservoirs, while the role of the Asteraceae and Poaceae families was simultaneously increased. The flora of reservoirs located in the zone of influence of JSC “SLPC” have a high degree of transformation: the flora of anthropogenic reservoirs is 100.0% composed of synanthropic species. The most active among them are *Bidens cernua* L., *Bidens tripartita* L., *Lycopus europaeus* L. and *Typha latifolia* L. The flora of anthropogenically transformed reservoirs are also significantly synanthropized ( $I_s=98.4-100.0\%$ ), the basis of their flora is apophytes. In anthropogenic reservoirs, vascular spore and moss-like plants are completely absent. The taxonomic structure of the flora of anthropogenically transformed reservoirs retains similarities with the flora of the reservoirs of the region. The analyzed flora includes species protected on the territory of the Komi Republic: *Riccia cavernosa* Hoffm. and *Carex pseudocyperus* L.

**Keywords:** flora of water bodies, synanthropization.

Целлюлозно-бумажная промышленность одна из ведущих отраслей промышленности России. Вместе с тем, по воздействию на окружающую среду она входит в число наиболее опасных для природной среды отраслей [1–3]. Целлюлозно-бумажное производство очень водоёмко, и его эффективное функционирование возможно лишь вблизи крупного водоёма. В процессе переработки древесины образуется большое количество загрязняющих веществ, в связи с чем оценка влияния целлюлозно-бумажной промышленности на водные экосистемы является весьма актуальной [4].

Цель – выявить и охарактеризовать таксономическую структуру флор водоёмов, находящихся в зоне влияния лесопромышленного комплекса АО «СЛПК».

### Материал и методы исследований

Район исследований расположен на северо-востоке европейской части России в Республике Коми (Сыктывдинский район). Согласно природно-климатическому районированию изученная территория лежит в подзоне средней тайги. Среднегодовая температура воздуха  $1^{\circ}\text{C}$ , среднегодовое количество осадков 621 мм [5].

Для оценки флористического разнообразия растительного покрова водных объектов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК», были выбраны следующие водоёмы (рис.): пруды аэрации (3 шт.); самотёчный канал; водохранилище Кылог; р. Вычегда в двух пунктах (первый – в районе АО «СЛПК» от места сброса очищенных сточных вод и далее вниз по течению реки на 3 км, второй – в районе д. Гавриловка в районе места сброса сточных вод и далее вниз по течению на 5 км). В качестве контроля был выбран участок поймы р. Вычегда на отрезке Сторожевск – Корткерос.

Пруды аэрации (рис.) представляют собой секции общей площадью  $1,65 \text{ км}^2$  с глубинами от 0 до 1 м. Назначение – биологическая доочистка сточных вод. Химический состав воды прудов аналогично составу вод самотёчного канала меняется от гидрокарбонатно-сульфатного кальциево-натриевого до сульфатно-гидрокарбонатного натриевого типа. Воды прудов значительно обогащены азот- и фосфорсодержащими органическими и минеральными соединениями (табл. 1).

Самотёчный канал (рис.) имеет длину 16 км, ширину до 20 м и глубину до 2 м.

Скорость течения  $0,2\text{--}0,3 \text{ м/с}$ . Назначение канала – отведение вод после системы биологической очистки в русло р. Вычегды. Воды канала – термальные: в нижней его части температура воды достигает в летний период  $22\text{--}23 (24)^{\circ}\text{C}$ . По составу воды канала относятся к гидрокарбонатно-сульфатному кальциево-натриевому типу с возвратной сменой на сульфатно-гидрокарбонатный натриевый. Воды обогащены азот- и фосфорсодержащими органическими и минеральными соединениями (табл. 1).

Водохранилище Кылог (рис.) образовано путём зарегулирования стока р. Кылог. Площадь водного зеркала –  $0,09 \text{ км}^2$ , глубины до 3 м. Вода в водохранилище Кылог относится к типу вод с гидрокарбонатным трёхкомпонентным (сложным) катионным составом. Его воды обогащены соединениями органического и минерального азота и фосфора (табл. 1).

Обследованные участки р. Вычегды (рис.) расположены непосредственно в зоне влияния подогретых сточных вод. Воды Вычегды относятся к гидрокарбонатно-кальциевому классу. Они обладают сравнительно низкой минерализацией и нейтральным значением рН. Основные гидрохимические показатели качества воды (содержание ионов кальция, магния, хлоридов, сульфатов, нитратов, тяжёлых металлов, нефтепродуктов, АПАВ и др.) находятся в пределах нормы, благодаря проводимой АО «СЛПК» модернизации очистных сооружений (табл. 1).

По происхождению и характеру антропогенной нагрузки анализируемые водоёмы подразделены на две группы: антропогенные (пруды аэрации и самотёчный канал) и антропогенно-трансформированные (водохранилище Кылог и участок р. Вычегды).

Полевые работы проведены согласно методическим разработкам для гидробиологических исследований [6]. Проанализированный видовой состав документирован гербарными сборами, хранящимися в УНУ «Научный гербарий Института биологии Коми НЦ УрО РАН (СЫКО)». Одновременно с выявлением разнообразия флоры сосудистых растений выполнены сборы мохообразных. Всего собрано 140 гербарных листов сосудистых растений и 15 многовидовых пакетов мохообразных. Мохообразные определены д.б.н. Г.В. Железновой (Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар).

Анализ химического состава вод выполнен в экоаналитической лаборатории Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Также при-

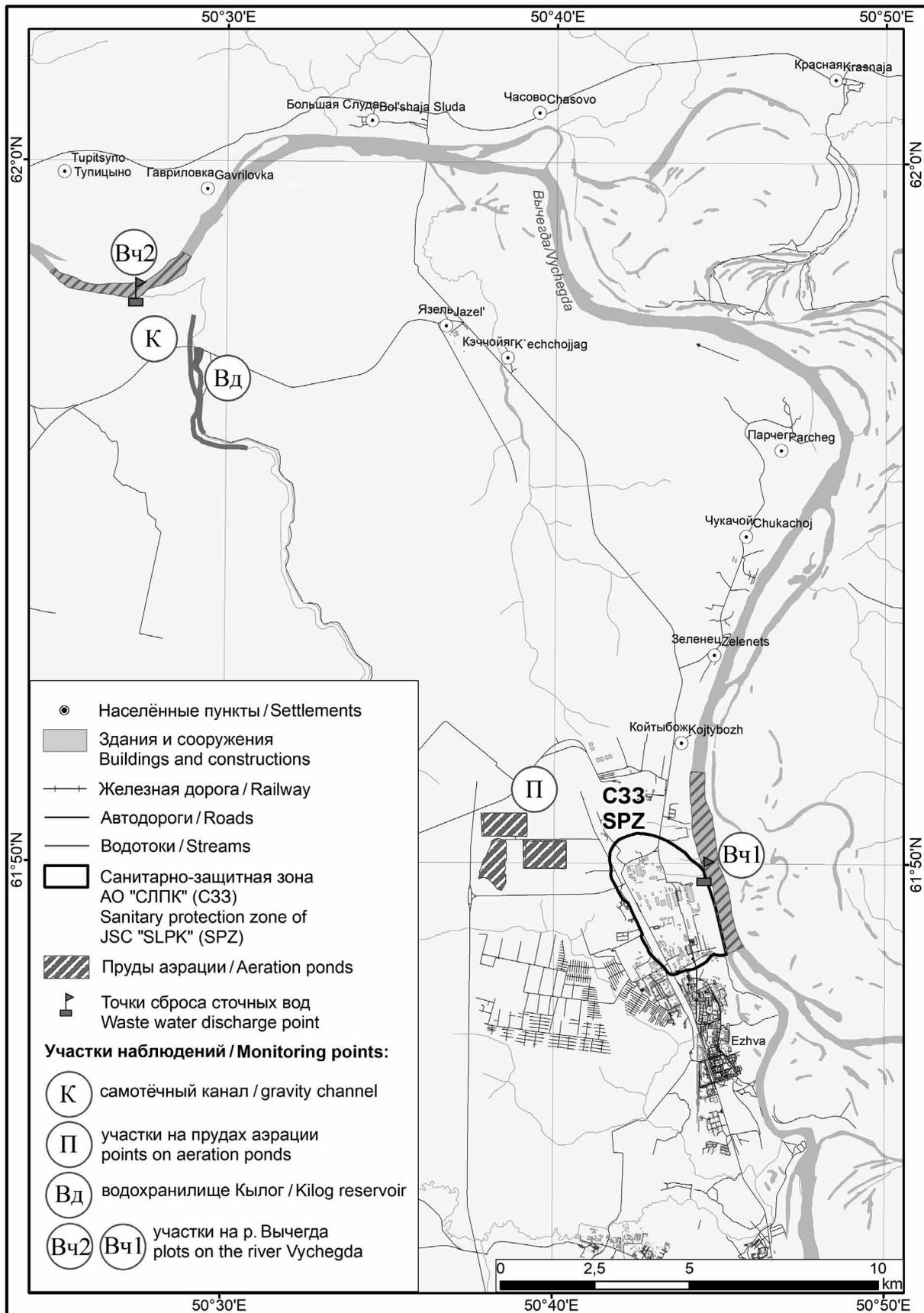


Рис. Район исследований  
 Fig. Research area

Таблица 1 / Table 1

Гидрохимические и гидрофизические показатели изученных водных объектов  
Hydrochemical and hydrophysical indicators studied water bodies

Показатель Parameter	Водоёмы / Water bodies					
	К	П	Вд	Вч		
				1-й участок 1st section	2-й участок 2nd section	Условный фон Conditional background
Удельная электропроводность, мкСм/см Electrical conductivity, $\mu\text{S}/\text{cm}$	1610±80	1090±60	447±22	195±10	247±12	216±11
pH	7,3±0,2	7,1±0,2	7,7±0,2	7,9±0,2	7,1±0,2	7,4±0,2
Мутность, ЕМФ Turbidity, FTU	54±8	>100	4,6±0,9	3,7±0,7	5,8±1,2	7,5±1,5
Прозрачность, см Transparence, sm	9	4	>30	>30	>30	>30
Цветность, градусы Chromaticity, degrees	295±29	175±17	76±8	57±6	66±7	47±10
БПК <sub>5</sub> , мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> BOD <sub>5</sub> , mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	4,6±0,7	13,1±1,8	1,1±0,15	1,46±0,2	1,46±0,2	2,00±0,27
Концентрация, мг/дм <sup>3</sup> / Concentration, mg/dm <sup>3</sup>						
Взвешенные вещества Suspended substances	64±8	155±14	<0,5	4,8±0,9	7,2±1,3	7,6±1,4
Ca	27±4	36±6	43±7	25±4	28±4	29±5
Cl	37±5	40±5	11,5±2,1	3,7±0,4	8,7±1,0	2,9±0,5
Fe	<0,05	0,103±0,025	0,46±0,11	0,33±0,08	0,34±0,08	<0,05
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	530±60	340±40	<1,0	99±12	124±15	136±29
K	39±6	22±4	0,99±0,24	0,55±0,13	1,9±0,3	0,79±0,19
Mg	4,6±0,7	7,2±1,1	12,0±1,8	5,0±0,8	5,1±0,8	6,9±1,1
Na	310±50	159±24	29±4	5,7±0,9	17,5±2,6	6,0±0,9
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,014±0,003	0,32±0,007	0,054±0,012	0,092±0,021	0,131±0,021	0,022±0,006
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1,3±0,08	0,255±0,018	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9,2±0,5	9,6±0,5	0,066±0,020	<0,010	0,14±0,04	<0,010
N <sub>total</sub>	18±3	16,1±2,9	0,56±0,1	4,6±0,8	4,0±0,7	<0,5
P <sub>total</sub>	0,52±0,12	0,31±0,1	0,059±0,019	<0,02	0,043±0,018	<0,02
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	190±23	115±14	16,3±2,1	15,0±1,9	26,0±3	18,1±2,3
XПК / COD	119±40	190±40	23±7	32±10	31±9	15±5
АПАВ Anionic surfactant	0,029±0,011	0,027±0,011	<0,025	0,032±0,013	0,033±0,013	<0,025
Нефтепродукты Petroleum products	0,03±0,011	0,068±0,024	0,018±0,006	0,011±0,004	0,010±0,004	<0,005
Перманганатная окисляемость / Permanganate oxidation	38±4	55±6	6,1±0,6	8,9±0,9	10,0±1,0	4,5±0,5
Концентрация, мкг/дм <sup>3</sup> / Concentration, $\mu\text{g}/\text{dm}^3$						
Al	420±100	93±22	11±3	6,4±2,0	8,3±2,7	14±5
Cu	11,0±2,0	3,9±1,0	17±3	2,0±0,6	2,2±0,6	<1,0
Mn	620±110	1110±200	<1,0	4,4±0,7	4,6±0,8	1,2±0,4
Hg	0,104±0,021	0,033±0,011	0,038±0,013	<0,01	<0,01	<0,01
Фенол / Phenol	3,2±0,6	1,5±0,27	<0,25	0,41±0,17	0,28±0,11	0,55±0,10

Примечание. Здесь и далее в таблицах 2–5: К – самотёчный канал, П – пруды аэрации, Вд – водохранилище Кылог, Вч – р. Вычегда в зоне влияния АО «СЛПК».

Note. Here and further in Tables 3 – 5: К – gravity channel, П – aeration ponds, Вд – Kylog Reservoir, Вч – The Vychedga river in the zone of influence of JSC “SLPC”.

влечены данные опубликованных материалов изучения качества вод р. Вычегды в условиях поступления очищенных сточных вод [7].

Латинские названия таксонов сосудистых растений даны по сводке С.К. Черепанова [8] и выверены по базе данных «IPNI» [9].

Для оценки степени нарушенности флоры использованы индексы [10]: индекс синантропности ( $I_s$ ):  $I_s = (A_p + A_d) \cdot 100\% / F$ ; индекс апофитности ( $I_{ap}$ ):  $I_{ap} = A_p / (A_d + A_p)$ ; индекс адвентивности ( $I_{ad}$ ):  $I_{ad} = A_d / F$ , где  $A_p$  – число видов апофитов;  $A_d$  – число видов адвентов;  $F$  – общее число видов во флоре.

При обработке материала использовали интегрированную ботаническую информационную систему IBIS 7.2 [11].

### Результаты и обсуждение

Флора водоёмов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК», объединяет 119 видов макрофитов, относящихся к 77 родам и 43 семействам (табл. 2 и 3). Цветковые растения в её составе представлены 114 видами, криптогамные макрофиты – пятью: из них сосудистые споровые – двумя (*Equisetum arvense* и *E. fluviatile*), мохообразные – тремя (*Philonotis fontana*, *Drepanocladus aduncus* и *Riccia cavernosa*).

В объединённой флоре ведущие позиции по числу видов занимают 14 семейств, включающие почти 2/3 её видового состава. Возглавляют список семейства Asteraceae – 12 видов (10,3%), Cyperaceae – 11 видов (9,4%) и Poaceae – 11 видов (9,4%) (табл. 4). Состав семейств, занимающих второстепенные позиции, аналогичен таковым в гидрофильных флорах региона (табл. 3).

Индивидуальные особенности таксономической структуры каждой из флор водоёмов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК» отражаются в составе и очередности расположения многовидовых семейств (табл. 4). Их число колеблется от трёх (водохранилище Кылог) до 11 (р. Вычегда). Как и число многовидовых семейств во флорах изученных водоёмов, нестабильным и слабо сопоставимым является состав ведущих семейств. Во всех четырёх флорах, за исключением самой бедной по числу видов флоры самотёчного канала, возглавляют списки ведущих семейств Asteraceae, Cyperaceae и Poaceae (табл. 4). Однако их очередность различна: в антропогенных водоёмах лидируют Poaceae и Asteraceae, тогда как в антропогенно-трансформированных – Cyperaceae и Asteraceae.

Типичные для флоры водоёмов региона рдесты (Potamogetonaceae) полностью отсутствуют в самотёчном канале, лишь единично представлены в канаве близ пруда аэрации, и только в водохранилище Кылог и в р. Вычегде были отмечены сообщества представителей данного семейства (*Potamogeton natans* и *Stuckenia pectinata*). Нимфейные (Nymphaeaceae) лишь один раз встречены в небольшом заливчике на р. Вычегде близ д. Гавриловки.

Таким образом, таксономическая структура флор водоёмов второй группы при имеющихся значительных изменениях всё-таки ещё сохраняет черты сходства с флорой водоёмов контрольного участка и региона в целом (табл. 4). Вхождение в группу ведущих семейств Polygonaceae, Onagraceae и Turphaceae, традиционно содержащих большое число антропохорных видов, вполне закономерно для обследованных водоёмов. Эти семейства объединяют от 10 до 20% видового состава. Во флоре самотёчного канала их доля составляет 19,4%, прудов аэрации – 18,1%, водохранилища Кылог – 9,6%, р. Вычегды – 12,5%. В составе флоры водоёмов контрольного участка доля антропохорных видов не превышает 6,5%.

В таксономической структуре флор изученных водоёмов велика доля семейств, представленных одним видом (табл. 4). Больше половины их в составе флоры самотёчного канала, прудов аэрации и водохранилища Кылог (табл. 4). Этот показатель отражает миграционный характер флоры, а также указывает на низкое разнообразие занимаемых флорой местообитаний [12].

Данные водоёмы испытывают более жёсткое воздействие в сравнении с обследованными участками р. Вычегды.

Наполненность видами родов во флорах изученных водоёмов очень неравномерная (табл. 4). В составе их флор преобладают одно-двух видовые роды. Они объединяют от 88 до 96% видового состава флоры. За редким исключением род содержит более 5 видов (табл. 4). Преобладание во флоре мало видовых родов – признак жёсткого антропогенного воздействия, которое обусловлено низким экологическим разнообразием, что было отмечено ранее.

В составе многовидовых родов сосредоточено от 9,4% (самотёчный канал) до 29,5% (пруды аэрации) видового состава их флор. Возглавляют списки ведущих родов *Carex*, *Salix* и *Epilobium* (табл. 4), при этом

Таблица 2 / Table 2

Список видов высших растений водоёмов в зоне влияния АО «СЛПК»  
List of species of higher plants of the flora of water bodies in the zone of influence of JSC «SLPC»

Сосудистые растения / Vascular plants
<b>Salicaceae:</b> <i>Salix caprea</i> L. – П; <i>S. gmelinii</i> Pall. – П, Вч; <i>S. myrsinifolia</i> Salisb. – П; <i>S. pentandra</i> L. – П, Вд; <i>S. phylicifolia</i> L. – П, Вд; <i>S. triandra</i> L. – Вд, Вч; <i>S. viminalis</i> L. – Вч;
<b>Betulaceae:</b> <i>Alnus incana</i> (L.) Moench – Вд;
<b>Grossulariaceae:</b> <i>Ribes nigrum</i> L. – К, П;
<b>Alismataceae:</b> <i>Alisma plantago-aquatica</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>Sagittaria sagittifolia</i> L. – Вч;
<b>Apiaceae:</b> <i>Angelica archangelica</i> L. – К; <i>Cicuta virosa</i> L. – Вд; <i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden. – П;
<b>Araceae:</b> <i>Calla palustris</i> L. – Вд;
<b>Asteraceae:</b> <i>Arctium tomentosum</i> Mill. – П; <i>Artemisia vulgaris</i> L. – К, П; <i>Bidens cernua</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>B. radiata</i> Thuill. – П, Вч; <i>B. tripartita</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop. – К, П; <i>C. setosum</i> (Willd.) Besser – К, П; <i>Filaginella rossica</i> (Kirp.) Tzvel. – Вч; <i>Gnaphalium uliginosum</i> L. – Вч; <i>Petasites spurius</i> (Retz.) Rchb. – Вч; <i>Taraxacum officinale</i> F. Wigg. – П, Вч; <i>Tussilago farfara</i> L. – П;
<b>Brassicaceae:</b> <i>Rorippa amphibia</i> (L.) Besser – Вч; <i>R. palustris</i> (L.) Besser – Вч;
<b>Butomaceae:</b> <i>Butomus umbellatus</i> L. – Вч;
<b>Callitricheae:</b> <i>Callitriche palustris</i> L. – Вд, Вч; <i>C. cophocarpa</i> Sendtn. – Вд;
<b>Caryophyllaceae:</b> <i>Cerastium arvense</i> L. – П; <i>Stellaria palustris</i> Ehrh.ex Hoff. – Вд;
<b>Ceratophyllaceae:</b> <i>Ceratophyllum demersum</i> L. – Вд, Вч;
<b>Chenopodiaceae:</b> <i>Chenopodium album</i> L. – П, Вч;
<b>Сyperaceae:</b> <i>Carex acuta</i> L. – П, Вч; <i>C. aquatilis</i> Wahlenb. – Вч; <i>C. appropinquata</i> Schumach. – Вд; <i>C. canescens</i> L. – П, Вд; <i>C. diandra</i> Schrank – Вд; <i>C. elongata</i> L. – Вд; <i>C. pseudocyperus</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>C. rhynchophyssa</i> C.A.Mey – Вд; <i>C. rostrata</i> Stokes – Вд; <i>Eleocharis acicularis</i> (L.) Roem. et Schult. – Вч; <i>E. palustris</i> (L.) Roem. et Schult. – П, Вч; <i>Schoenoplectus lacustris</i> (L.) Palla – Вч; <i>Scirpus sylvaticus</i> L. – Вч;
<b>Equisetaceae:</b> <i>Equisetum arvense</i> L. – Вд, Вч; <i>E. fluviatile</i> L. – Вд, Вч;
<b>Fabaceae:</b> <i>Lathyrus pratensis</i> L. – П; <i>Vicia cracca</i> L. – П;
<b>Hydrocharitaceae:</b> <i>Hydrocharis morsus-ranae</i> L. – Вд;
<b>Juncaceae:</b> <i>Juncus articulatus</i> L. – П; <i>J. bufonius</i> L. – П; Вч; <i>J. compressus</i> Jacq. – Вч; <i>J. filiformis</i> L. – Вч;
<b>Lamiaceae:</b> <i>Galeopsis bifida</i> Boenn. – П; <i>Lamium album</i> L. – П; <i>Lycopus europaeus</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>Mentha arvensis</i> L. – Вч; <i>Prunella vulgaris</i> L. – Вч; <i>Scutellaria galericulata</i> L. – К, П, Вд;
<b>Lemnaceae:</b> <i>Lemna minor</i> L. – К, П, Вд; <i>Spirodela polyrhiza</i> (L.) Schleid. – Вд;
<b>Lentibulariaceae:</b> <i>Utricularia minor</i> L. – П;
<b>Lythraceae:</b> <i>Lythrum portula</i> (L.) DAWebb – Вч;
<b>Nymphaeaceae:</b> <i>Nuphar lutea</i> (L.) Sm. – Вч;
<b>Onagraceae:</b> <i>Epilobium angustifolium</i> L. – К, П; <i>E. hirsutum</i> L. – К, П, Вч; <i>E. palustre</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>E. roseum</i> Schreb. – П, Вч;
<b>Plantaginaceae:</b> <i>Plantago major</i> L. – П; <i>P. uliginosa</i> F.W.Schmidt – Вч;
<b>Poaceae:</b> <i>Agrostis capillaris</i> L. – К; <i>A. stolonifera</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>Alopecurus aequalis</i> Sobol. – К, П, Вч; <i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth – П; <i>C. purpurea</i> (Trin.) Trin. – П, Вд; <i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv. – К, П, Вч; <i>Elymus fibrosus</i> (Schrenk) Tzvelev – К; <i>E. repens</i> (L.) Gould – К; <i>Phalaroides arundinacea</i> (L.) Rauschert – К, П, Вд, Вч; <i>Phleum pratense</i> L. – П; <i>Poa palustris</i> L. – К, П, Вч; <i>P. pratensis</i> L. – П;
<b>Polygonaceae:</b> <i>Persicaria amphibia</i> (L.) Delarbre – Вч; <i>P. lapathifolia</i> (L.) Delarbre – К, П, Вч; <i>Rumex aquaticus</i> L. – П, Вд, Вч; <i>R. ucranicus</i> Fisch. ex Spreng. – К, П;
<b>Potamogetonaceae:</b> <i>Potamogeton alpinus</i> Balb. – П; <i>P. berchtoldii</i> Fieber – П, Вд; <i>P. lucens</i> L. – Вч; <i>P. natans</i> L. – Вд, Вч; <i>Stuckenia pectinata</i> (L.) Borner – Вч;
<b>Primulaceae:</b> <i>Androsace filiformis</i> Retz. – Вч; <i>Lysimachia thyrsiflora</i> L. – Вд, Вч; <i>L. vulgaris</i> L. – Вч;
<b>Ranunculaceae:</b> <i>Ranunculus repens</i> L. – К, П, Вд, Вч; <i>R. sceleratus</i> L. – К, Вч;
<b>Rosaceae:</b> <i>Comarum palustre</i> L. – П, Вд; <i>Fragaria vesca</i> L. – Вч; <i>Potentilla anserina</i> L. – Вч;
<b>Rubiaceae:</b> <i>Galium aparine</i> L. – П; <i>G. palustre</i> L. – К, Вд;
<b>Scrophulariaceae:</b> <i>Limosella aquatica</i> L. – Вч; <i>Veronica anagallis-aquatica</i> L. – Вч; <i>V. beccabunga</i> L. – Вч; <i>V. longifolia</i> L. – К;
<b>Solanaceae:</b> <i>Solanum dulcamara</i> L. – П;

<b>Typhaceae:</b> <i>Sparganium angustifolium</i> Michx. – П; <i>S. emersum</i> Rehm. – П, Вд, Вч; <i>S. natans</i> L. – П; <i>Typha latifolia</i> L. – К, П, Вд, Вч;
<b>Urticaceae:</b> <i>Urtica dioica</i> L. – К, П;
<b>Мохообразные / Mosses</b>
<b>Bartramiaceae:</b> <i>Philonotis fontana</i> (Hedw.) Brid. – Вд;
<b>Amblystegiaceae:</b> <i>Drepanocladus aduncus</i> (Hedw.) Warnst. – Вд;
<b>Ricciaceae:</b> <i>Riccia cavernosa</i> Hoffm. – Вч.

Таблица 3 / Table 3

Таксономическая структура флор водоёмов в зоне влияния АО «СЛПК»  
Taxonomic structure of the flora of water bodies in the zone of influence of JSC “SLPC”

Показатель Parameter	Водоём / Water body					
	К	П	Вд	Вч	Оф	Кт
Общее число видов / Total number of species	31	61	42	64	119	118
Общее число родов / Total number of genera	24	42	30	45	75	77
Общее число семейств Total number of families	15	25	26	26	40	43
Среднее число видов в роде Average number of species in the genus	1,3	1,5	1,4	1,4	1,6	1,5
Среднее число видов в семействе Average number of species in a family	2,1	2,4	1,6	2,5	3,0	2,7
Среднее число родов в семействе Average number of genera in a family	1,6	1,7	1,2	1,7	1,9	1,8
Родовой коэффициент, % Generic coefficient, %	77,4	68,9	71,4	70,3	63,1	65,3
Число одновидовых родов Number of single-species genera	18 (75,0)	31 (73,8)	24 (80,0)	31 (68,9)	52 (69,3)	53 (68,8)
Число (доля) двувидовых родов Number (proportion) of two-species genera	5 (20,8)	6 (14,3)	4 (13,3)	9 (20,0)	15 (20,0)	18 (23,4)
Число (доля) одновидовых семейств Number (proportion) of single-species families	9 (60,0)	13 (52,0)	15 (57,7)	7 (26,9)	15 (37,5)	15 (34,9)
Число (доля) двувидовых семейств Number (proportion) of two-species families	3 (20,0)	3 (12,0)	7 (26,9)	7 (26,9)	10 (25,0)	12 (27,9)
Максимальное число видов в одном роде Maximum number of species in one genus	3	5	7	3	9	10
Макс. число видов в одном семействе Max. number of species in one family	8	9	7	7	13	11
Макс. число родов в одном семействе Max. number of genera in one family	6	7	3	5	9	8
Доля видов в 5 ведущих родах, % Proportion of species in 5 leading genera, %	35,5	29,5	38,0	23,4	23,5	22,1
Доля видов в 5 ведущих семействах, % Proportion of species in 5 leading families, %	64,5	50,8	40,4	39,1	42,1	35,6
Доля мхов, % / Proportion of mosses, %	–	–	4,8	3,1	2,5	8,5
Доля сосудистых споровых, % Proportion of vascular spore plants, %	–	–	4,8	3,1	1,7	1,7
Доля цветковых, % Proportion of flowering plants, %	100,0	100,0	90,5	93,8	95,8	89,8

Примечание. Здесь и далее в таблицах 4 и 5: Оф – объединённая флора, Кт – флора контрольного участка поймы р. Вычегды.

Note. Here and further in Tables 4 and 5: Оф – united flora, Кт – flora of the control flow of the floodplain of the Vy-chegda river.

Таблица 4 / Table 4

Ведущие семейства и роды флоры водоёмов в зоне влияния АО «СЛПК» и контрольных водоёмов  
The leading families and genera of the flora of water bodies in the zone of influence of JSC "SLPC" and control water bodies

Таксон Taxon	К		II		ВД		Вч		Кт		Вб	
	R	N (P, %)	R	N (P, %)	R	N (P, %)	R	N (P, %)	R	N (P, %)	R	N (P, %)
Asteraceae	2	5 (15,6)	1-2	9 (14,8)	-	-	1-2	7 (10,6)	4	6 (6,1)	2	23 (7,1)
Рoaceae	1	8 (25,0)	1-2	9 (14,8)	2-3	3 (7,1)	3	5 (7,6)	2-3	10 (8,4)	3	22 (6,7)
Сурерaceae	-	-	4	4 (6,6)	1	7 (16,7)	1-2	7 (10,6)	1	11 (9,3)	1	29 (8,9)
Lamiaceae	3-4	3 (9,4)	5	4 (6,6)	-	-	6-11	3 (4,5)	10-16	3 (2,5)	9-12	8 (2,5)
Salicaceae	-	-	3	5 (8,2)	2-3	3 (7,1)	6-11	3 (4,5)	6-9	4 (3,4)	5	16 (4,9)
Juncaceae	-	-	-	-	-	-	4-5	4 (6,1)	10-16	3 (2,5)	17-21	5 (1,5)
Polygonaceae	-	-	8	3 (4,9)	-	-	4-5	4 (6,1)	5	5 (4,2)	7-8	12 (3,7)
Potamogetonaceae	-	-	-	-	-	-	6-11	3 (4,5)	2-3	10 (8,4)	4	20 (6,1)
Onagraceae	3-4	3 (9,4)	6	4 (6,6)	-	-	6-11	3 (4,5)	-	-	22-26	4 (1,2)
Typhaceae	-	-	7	4 (6,6)	-	-	-	-	-	-	9-12	8 (2,5)
Scrophulariaceae	-	-	-	-	-	-	6-11	3 (4,5)	-	-	17-21	5 (1,5)
Primulaceae	-	-	-	-	-	-	6-11	3 (4,5)	-	-	22-26	4 (1,2)
Всего / Total:	-	19 (59,4)	-	42 (69,1)	-	13 (30,9)	-	45 (68,0)	-	79 (67,5)	-	156 (47,8)
Carex	-	-	3-5	3 (4,9)	1	7 (16,7)	1-6	3 (4,5)	2	6 (5,1)	1	19 (5,8)
Salix	-	-	1	5 (8,2)	2	3 (7,1)	1-6	3 (4,5)	3	4 (3,4)	3	15 (4,6)
Epilobium	1	3 (9,4)	2	4 (6,6)	-	-	1-6	3 (4,5)	-	-	11-16	4 (1,2)
Juncus	-	-	-	-	-	-	1-6	3 (4,5)	4	3 (2,5)	9-10	5 (1,5)
Potamogeton	-	-	-	-	-	-	-	-	1	10 (8,5)	2	18 (5,5)
Bidens	-	-	3-5	3 (4,9)	-	-	1-6	3 (4,5)	-	-	17-33	3 (0,9)
Persicaria	-	-	-	-	-	-	1-6	3 (4,5)	4	3 (2,5)	4-5	7 (2,1)
Sparganium	-	-	3-5	3 (4,9)	-	-	-	-	-	-	11-16	4 (1,2)
Eleocharis	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3 (2,5)	5-6	7 (2,1)
Всего / Total:	-	3 (9,4)	-	18 (29,5)	-	10 (23,8)	-	18 (27,5)	-	29 (24,5)	-	82 (24,9)

Примечание. Вб – водоёмы бассейна среднего течения р. Вытегоды; R – ранг; N – число видов; P – доля; (-) – прочерком отмечены семейства и роды, не входящие в число ведущих, либо отсутствующие.

Note. Вб – water bodies of the basin of the middle course of the Vyteghda river, R – the rank; N – the number of species; P – the proportion; (-) – families and genera that are not among the leading ones or are absent are marked with a dash.

Таблица 5 / Table 5

Показатели синантропизации флоры водоёмов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК»  
Parameters of synanthropization of the flora of reservoirs located in the zone of influence of JSC «SLPC»

Водоём / Water body	Индекс / Index		
	синантропности synanthropy (Is), %	апофитности apophytity (Iap), %	адвентивности adventivity (Iad), %
Самотёчный канал / Gravity channel	100,0	74,2	25,8
Пруды аэрации / Aeration ponds	100,0	75,4	24,6
Водохранилище Кылог / Kylog Reservoir	100,0	92,9	7,1
Р. Вычегда / The Vycheгда river	98,4	85,7	14,1

в контрольных водоёмах и водоёмах региона в целом ведущее положение принадлежит родам *Carex*, *Potamogeton* и *Salix*. Основное отличие родового спектра анализируемых флор – отсутствие в составе ведущих р. *Potamogeton* (неотъемлемого компонента водных флор) и присутствие в списке ведущих р. *Bidens* (табл. 4).

Отношение числа видов флоры к числу родов (родовой коэффициент флоры) является отражением разнообразия её экологических условий. Чем выше значение коэффициента, тем ниже разнообразие занимаемых флорой экотопов [13]. Для объединённой флоры, включающей в себя всё экотопическое разнообразие изученных водных объектов, родовой коэффициент составляет 63,1% (табл. 3), в то время как для каждого изученного типа водоёмов его значение от 68,9 до 77,4%.

Коэффициент сходства (по Жаккару) видового состава каждой из флор с флорой водоёмов контрольного участка не превышает 36%. У флор самотёчного канала и флоры прудов аэрации значение коэффициента сходства ещё ниже – 11 и 19% соответственно.

Общими для флор всех типов водоёмов являются 10 видов: *Alisma plantago-aquatica*, *Bidens cernua*, *B. tripartita*, *Carex pseudocyperus*, *Lycopus europaeus*, *Epilobium palustre*, *Agrostis stolonifera*, *Phalaroides arundinacea*, *Ranunculus repens* и *Typha latifolia*. Их доля в объединённой флоре составляет 8,4%, во флоре самотёчного канала – 32,3%, прудов аэрации – 16,4%, водохранилища Кылог – 23,8%, р. Вычегды в зоне влияния АО «СЛПК» – 15,6%. Три их общих вида (*Bidens cernua*, *B. tripartita* и *Typha latifolia*) – адвентивны для флоры региона.

Флора каждого водоёма имеет в своём составе «уникальные» (присутствующие только в ней) виды. Во флоре самотёчного канала таких видов – 5 (16,2%), прудов аэрации – 20 (32,8%), водохранилища Кылог – 14 (33,3%), р. Вычегды в зоне влияния АО «СЛПК» – 30 (46,8%).

Сосудистые споровые и мхи в антропогенных водоёмах не отмечены.

Анализ степени синантропности флор водоёмов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК», показал высокую степень трансформированности их флор (табл. 5). Флора антропогенных водоёмов полностью составлена толерантными к антропогенным нарушениям видами, из которых 15 (8 – для флоры самотёчного канала и 15 – для прудов аэрации) существуют в регионе благодаря антропогенному фактору. Это адвентивные виды (табл. 5).

Наиболее активные среди них череда поникшая (*Bidens cernua*), череда трёхраздельная (*Bidens tripartite*), зюзник европейский (*Lycopus europaeus*) и рогоз широколистный (*Typha latifolia*). На долю адвентивного компонента во флоре прудов и канала приходится около четверти их видового разнообразия (табл. 5). Остальные 75% это виды природной флоры, способные произрастать на импактных экотопах (апофиты). Флоры антропогенно-трансформированных водоёмов также значительно синантропизированы (Is=98,4 и 100,0%), но доля участия в них заносных видов заметно ниже (табл. 5). Основу их флоры составляют апофиты. В составе флоры р. Вычегды отмечен один индигенофит – *Riccia cavernosa*.

### Заключение

Флора водоёмов в зоне влияния АО «СЛПК» объединяет 119 видов макрофитов, относящихся к 77 родам и 43 семействам. Цветковые растения в её составе представлены 114 видами, а криптогамные – пятью: сосудистые споровые – двумя, мохообразные – тремя.

Ведущие позиции по числу видов занимают Asteraceae, Cyperaceae и Poaceae: в антропогенных водоёмах – Poaceae и Asteraceae, в антропогенно-трансформированных – Cyperaceae и Asteraceae. Списки ведущих

родов возглавляют *Carex*, *Salix* и *Epilobium*. Сосудистые споровые и мхи в антропогенных водоёмах не отмечены.

Флоры водоёмов, находящихся в зоне влияния АО «СЛПК», испытывают высокую антропогенную нагрузку. Об этом свидетельствуют большая доля одновидовых семейств и родов и повышенные значения родового коэффициента (от 68,9 до 77,4% – отдельно для каждого типа водоёмов).

Таксономическая структура флор антропогенно-трансформированных водоёмов хоть и претерпела серьёзные изменения, но всё же сохраняет черты сходства с флорой водоёмов контрольного участка и региона в целом.

Коэффициент сходства (по Жаккару) каждой из флор с флорой водоёмов контрольного участка не превышает 36%.

В составе анализируемых флор присутствуют охраняемые на территории Республики Коми виды [14]: *Riccia cavernosa* (III) и *Carex pseudocyperus* (III).

Флоры водоёмов, находящиеся в зоне влияния АО «СЛПК», имеют высокую степень трансформированности: флора антропогенных водоёмов на 100,0% составлена синантропными видами ( $I_s=100,0\%$ ). Наиболее активные среди них *Bidens cernua*, *Bidens tripartita*, *Lycopus europaeus* и *Typha latifolia*. Флоры антропогенно-трансформированных водоёмов также значительно синантропизированы ( $I_s=98,4-100,0\%$ ), но доля участия в них заносных видов ниже. Основу их флоры составляют апофиты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта «Оценка долговременного влияния АО «Монди СЛПК»» (договор № 45-2018/180405). Авторы статьи благодарны М.А. Василевич за помощь в подготовке карты-схемы.*

## References

1. Berkman E.M., Vishnevsky S.M., Ioffe L.O. Dictionary of pulp and paper production / Ed. N.V. Ryukhin. Moskva: Timber industry, 1969. 299 p. (in Russian).
2. Likhanova I.A., Genrikh E.A., Perminova E.M., Zheleznova G.V., Kholopov Yu.V., Lapteva E.M. The effects

of clear cutting on the biodiversity of middle taiga blueberry spruce forests in the North-East of European Russia // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 56–65 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-056-065

3. Ufimtsev K.G., Beshley I.V., Shirshova T.I., The content of extractive substances in the products of destruction of bark-woods wastes generated during long-term storage, taking into account the vertical gradient // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 144–150 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-144-150

4. Baturina M.A., Kononova O.N. The influence of wastewater from pulp and paper industry enterprises on aquatic zoocenoses: literature review // Siberian Ecological Journal. 2021. No. 6. P. 685–695 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20210601

5. Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology. Moskva: Drofa, 1997. 115 p. (in Russian).

6. Katanskaya V.M. Higher aquatic vegetation of continental water bodies of the USSR. Study methods. Leningrad: Nauka, 1981. 187 p. (in Russian).

7. Patova E.N., Kondratenok B.M., Sivkov M.D., Kostrova S.N. Water quality of the Vychegda River under the conditions of the receipt of treated wastewater from the pulp and paper industry // Siberian Ecological Journal. 2021. No. 6. P. 696–714 (in Russian). doi: 10.15372/SEJ20210602

8. Cherepanov S.K. Vascular plants of Russia and neighboring states (within the former USSR). Sankt-Peterburg: Mir i Semya, 1995. 992 p. (in Russian).

9. IPNI: The International Plant Names Index and World Checklist of Vascular Plants 2023 [Internet resource] <http://www.ipni.org> (Accessed: 01.02.2023).

10. Gorchakovskiy P.L., Telegova O.V. Comparative assessment of the level of synanthropization of the vegetation cover of specially protected natural areas // Ecology. 2005. No. 6. P. 403–408 (in Russian).

11. Zverev A.A. Information technology in vegetation research: Textbook. Tomsk: Isdatel'stvo tomского gosudarstvennogo universiteta, 2007. 304 p. (in Russian).

12. Schmidt V.M. Flora of the Arkhangelsk region. Sankt-Peterburg: Isdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo universiteta, 2005. 346 p. (in Russian).

13. Tolmachev A.I. Introduction to plant geography. Leningrad: Nauka, 1974. 244 p. (in Russian).

14. Red Data Book of the Komi Republic. Syktyvkar / Ed. S.V. Degteva. Syktyvkar: Komi respublikanskoe isdatel'stvo, 2019. 768 p. (in Russian).

## Detection of trace cyanide in water by isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone polarography

© 2024. X. H. Li<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-3435-6852<sup>\*</sup>

Y. Chen<sup>1, 2</sup> ORCID: 0009-0006-9250-3159<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Liaoning Institute of Science and Technology,  
176, Xianghuai Rd., Benxi, Liaoning, P. R. China, 117004,

<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000  
e-mail: 184203287@qq.com

To enhance the detection sensitivity of cyanide, a method was proposed for the determination of trace cyanide in water by using isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone polarography. Under optimized experimental conditions, cyanide reacted with chloramine T, isonicotinic acid, and pyrazolone, and bispyrazolone to form a stable blue dye, which produced a sensitive polarographic wave at a peak potential of -766 mV (vs. Ag/AgCl) on the dropping mercury electrode. The results showed that there was a good linear relationship between the cyanide concentration and the second-order derivative peak current ( $i_p''$ ) in the range of 0.32–60  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , with an impressive detection limit of 0.08  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Bispyrazolone could effectively inhibit the decomposition of the blue dye and increase  $i_p''$  by 12%. The polarographic wave originated from the two-electron reduction of the carbonyl group on the pyrazolinone moiety of the blue dye, exhibiting an irreversible adsorptive characteristic. The method was successfully applied to the determination of cyanide in drinking water, groundwater, and surface water, with relative standard deviations of less than 4.5% and recovery rates ranging from 96.7 to 107%. The method significantly lowered the detection limit of cyanide and exhibited high precision and accuracy, making it suitable for the analysis of trace cyanide in water.

**Keywords:** cyanides, polarography, isonicotinic acid, pyrazolone, bispyrazolone.

УДК 543.552+543.31

## Определение следов цианида в воде методом полярографии изоникотиновой кислоты – пиразолона – биспиразолона

© 2024. Сяохуэй Ли<sup>1</sup>, доктор наук, доцент,

Я Чен<sup>1, 2</sup>, студент,

<sup>1</sup>Ляонинский институт науки и технологии,  
117004, КНР, провинция Ляонин, г. Бэньси, Сянхуай Роуд, д. 176,

<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: 184203287@qq.com

Для повышения чувствительности обнаружения цианида был предложен метод определения следов цианида в воде с помощью полярографии изоникотиновой кислоты – пиразолона – биспиразолона. В оптимизированных условиях эксперимента цианид реагировал с хлорамином Т, изоникотиновой кислотой, пиразолоном и биспиразолоном с образованием стабильного синего красителя, который генерировал чувствительную полярографическую волну с пиковым потенциалом -766 мВ (против Ag/AgCl) на ртутном капельном электроде. Результаты показали, что существует хорошая линейная зависимость между концентрацией цианида и пиковым током производной второго порядка ( $i_p''$ ) в диапазоне 0,32–60 мкг/л, с пределом обнаружения 0,08 мкг/л. Биспиразолон эффективно ингибирует разложение синего красителя и увеличивает  $i_p''$  на 12%. Полярографическая волна возникла в результате двухэлектронного восстановления карбонильной группы на пиразолиноновом мотиве синего красителя, проявляя необратимую адсорбционную характеристику. Метод был успешно применён для определения цианида в питьевой воде, грунтовых и поверхностных водах с относительными стандартными отклонениями менее 4,5% и коэффициентами восстановления от 96,7 до 107%. Метод продемонстрировал высокую точность и достоверность, значительно снизил предел обнаружения цианида, что делает его пригодным для анализа следов цианида в воде.

**Ключевые слова:** цианиды, полярография, изоникотиновая кислота, пиразолон, биспиразолон.

The majority of cyanides enter the environment with industrial effluents. Cyanides are fastest-acting and highly toxic substances and even their trace amounts pose potential hazards to humans and ecosystems, making them one of the priority pollutants for water quality monitoring [1]. Environmental cyanides may be water-soluble inorganic salts (NaCN or KCN) or unbound substances ( $\text{CN}^-$  or HCN); the latter being the most toxic [2].

Therefore, accurately determining trace cyanides in environmental water is of great significance for environmental protection and human health. Currently, the primary methods for detecting cyanides in water include spectrophotometry [3], ion chromatography [4], flow injection analysis [5], polarography [6], among others. Among these, polarography stands out in the field of environmental monitoring due to its simplicity of operation, rapid analysis, high sensitivity, and low equipment cost.

The isonicotinic acid – pyrazolone spectrophotometry based on the Konig reaction [7] is one of the primary methods for analyzing cyanides. However, its detection limit of  $0.016 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  [8] falls short of meeting the requirements for detecting trace cyanides in clean water sources such as drinking water or groundwater. Research has shown that replacing spectroscopic analysis with polarographic analysis can significantly enhance the sensitivity, thereby lowering the detection limit [9]. Guo et al. successfully applied the isonicotinic acid – pyrazolone polarography to analyze trace cyanides in food and drinking water, however, they did not delve into the analysis mechanism [10]. Moreover, the reaction products of this system are unstable, leading to poor precision. Building upon this, our experiment explored the method for determining trace cyanide in water using the isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone polarography.

### Objects and methods of research

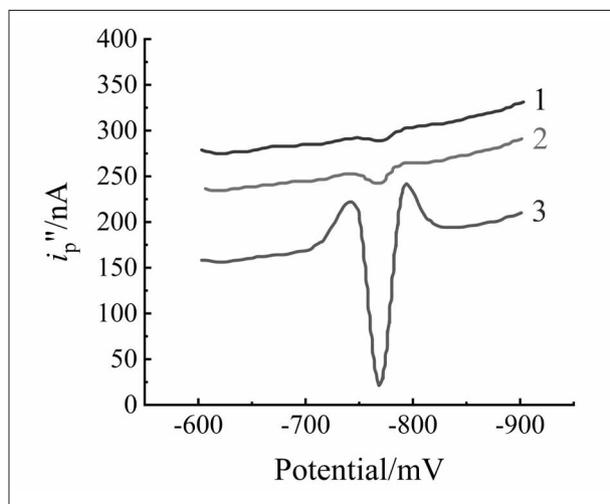
**Instruments and reagents.** JP-303 polarograph with a three-electrode system consisting of a dropping mercury electrode (or a hanging mercury drop electrode for cyclic voltammetry (CV) measurement), a platinum wire auxiliary electrode, and a Ag/AgCl reference electrode. Standard material for cyanogen analysis in water:  $50.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (GBW(E)080115). Cyanide standard solution:  $1.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $0.100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , prepared by diluting the standard material with 0.1% (mass fraction, the same below) NaOH

solution. Chloramine T solution:  $5.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , prepared by dissolving 0.50 g of chloramine T in 100 mL water. Bispyrazolone solution:  $1.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , prepared by dissolving 0.10 g of bispyrazolone in 100 mL of N,N-dimethylformamide. Pyrazolone solution ( $12.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ): 1.25 g of pyrazolone dissolved in 100 mL of N,N-dimethylformamide. Isonicotinic acid solution ( $15.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 1.50 g of isonicotinic acid dissolved in 25 mL of 2.0% NaOH solution and diluted with water to 100 mL. Bispyrazolone – pyrazolone – isonicotinic acid solution: bispyrazolone solution, pyrazolone solution, and isonicotinic acid solution mixed in a volume ratio of 1:2:10. Phosphate buffer solution: 34.0 g of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and 35.5 g of  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  dissolved in 1000 mL of water.

Bispyrazolone (bis(3-methyl-1-phenyl-5-pyrazolone)) (98%); pyrazolone (1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone) (99%); sodium hydroxide (GR); other reagents are analytical – reagent grade. The experimental water is ultrapure water (resistivity  $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ ).

**Experimental Method.** The test samples were pre-treated according to the distillation method and interference elimination method described in HJ 484–2009 [8]. When the research object is cyanide standard solution, pre-treatment is not required. Take an appropriate amount of cyanide standard solution or pre-treated test sample into a 25 mL colorimetric tube, and dilute it to 10 mL with 0.1% NaOH solution. Subsequently, add 5.0 mL phosphate buffer solution and 0.2 mL chloramine T solution in sequence, mix immediately, and allow to stand for 3–5 min. After that, add 2.6 mL bispyrazolone – pyrazolone – isonicotinic acid solution, dilute the solution to 25 mL, and mix thoroughly. Next, place the colorimetric tube in a water bath at  $35^\circ\text{C}$  for a reaction time of 60 min, then remove and let it stand at room temperature for another 10 min. This is the test solution to be analyzed. Transfer a portion of the test solution into a 10 mL beaker and analyze it using a polarograph. Set the initial potential to  $-500 \text{ mV}$ , the scan rate to  $-700 \text{ mV/s}$ , and record the second-order derivative peak current ( $i_p''$ ) at the peak potential of  $-766 \text{ mV}$  (Fig. 1).

**Reaction Mechanism.** Under neutral conditions, cyanides in water react with the hydrolysis product (HClO) of chloramine T to generate CNCl, which then reacts with isonicotinic acid and undergoes hydrolysis to form 3-carboxypentenedialdehyde. Subsequently, 3-carboxypentenedialdehyde then undergoes condensation reaction with pyrazolone to generate a blue dye. Bispyrazolone is used to eliminate residual HClO



**Fig. 1.** Polarographic wave: 1 – reagent blank; 2 –  $\rho(\text{CN}^-) = 0.32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 3 –  $\rho(\text{CN}^-) = 10.0 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

and stabilize the blue dye. The  $i_p''$  value of the blue dye at  $-766 \text{ mV}$  (vs.  $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ) is measured by a polarograph.

## Results and discussion

### Determination of Analytical Conditions.

The experimental conditions were investigated using a cyanide standard solution ( $0.100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of  $7.00 \text{ mL}$  as the research subject.

The effects of pH values at 6.9, 7.0, 7.1, 7.2, 7.3, and 7.4 on  $i_p''$  were examined. The results showed that when the pH ranged from 7.0 to 7.3,  $i_p''$  reached its maximum value and remained stable. Therefore, a pH of 7.0 was selected for the experiment, controlled by adding  $5.0 \text{ mL}$  of phosphate buffer solution.

The effects of adding chloramine T solution at volumes of  $0.05$ ,  $0.10$ ,  $0.20$ ,  $0.30 \text{ mL}$  and reaction times of 1, 2, 3, 4, 5, 6 min on  $i_p''$  were investigated. The results indicated that when the volume of chloramine T solution ranged from  $0.1$  to  $0.3 \text{ mL}$  and the reaction time was 3 to 5 min,  $i_p''$  reached its maximum and remained stable. Thus,  $0.2 \text{ mL}$  of chloramine T solution, corresponding to a concentration of  $0.040 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , was chosen, and the reaction time for converting cyanide to  $\text{CNCl}$  was set at 3–5 min.

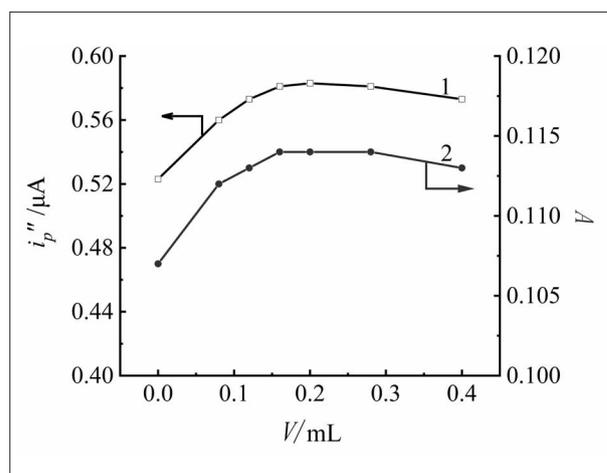
The effects of adding isonicotinic acid solution at volumes of  $1.0$ ,  $1.5$ ,  $2.0$ ,  $2.5$ ,  $3.0$ ,  $3.5 \text{ mL}$  on  $i_p''$  were examined. The results showed that when the volume of isonicotinic acid solution ranged from  $1.5$  to  $3.0 \text{ mL}$ ,  $i_p''$  reached its maximum and remained stable. Therefore,  $2.0 \text{ mL}$  of isonicotinic acid solution, corresponding to a concentration of  $1.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , was selected.

The effects of adding pyrazolone solution at volumes of  $0.20$ ,  $0.30$ ,  $0.40$ ,  $0.50$ ,  $0.60 \text{ mL}$  on  $i_p''$  were investigated. The results indicated that when the volume of pyrazolone solution ranged from  $0.30$  to  $0.50 \text{ mL}$ ,  $i_p''$  reached its maximum and remained stable. Thus,  $0.40 \text{ mL}$  of pyrazolone solution, corresponding to a concentration of  $0.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , was chosen.

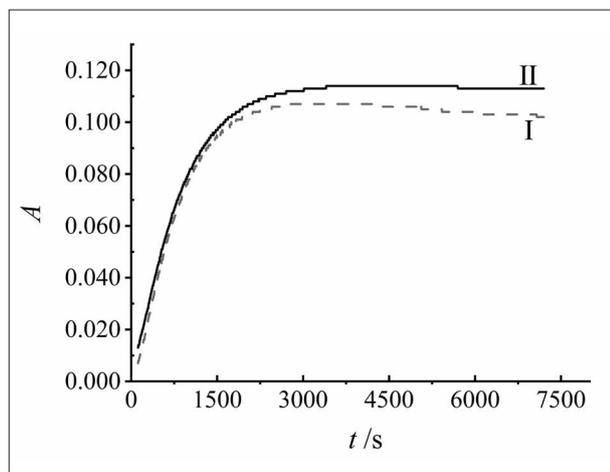
To investigate the role of bispyrazolone, the absorbance ( $A$ ) of the test solution was measured simultaneously. The effects of adding bispyrazolone solution at volumes ( $V$ ) of  $0$ ,  $0.08$ ,  $0.12$ ,  $0.16$ ,  $0.20$ ,  $0.28$ ,  $0.40 \text{ mL}$  on  $i_p''$  and  $A$  were examined, and the results are shown in Figure 2. The results showed that when  $V$  was less than  $0.2 \text{ mL}$ , both  $i_p''$  and  $A$  increased simultaneously with increasing  $V$ ; when  $V$  was greater than  $0.2 \text{ mL}$ , both  $i_p''$  and  $A$  decreased simultaneously with increasing  $V$ . Therefore,  $0.20 \text{ mL}$  of bispyrazolone solution, corresponding to a concentration of  $8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , was selected. Compared to  $V = 0 \text{ mL}$ ,  $i_p''$  at  $V = 0.20 \text{ mL}$  increased by 12%, indicating that the addition of bispyrazolone improved the sensitivity of the method.

The  $A \sim V$  variation indirectly reflected the effect of bispyrazolone on the concentration of the blue dye produced by the König reaction. The  $A \sim V$  trend was basically consistent with the  $i_p'' \sim V$  trend, indicating that bispyrazolone enhanced the sensitivity of polarographic analysis by increasing the concentration of the blue dye.

To simplify the operation and avoid the loss of  $\text{CNCl}$ , bispyrazolone solution, pyrazolone solution, and isonicotinic acid solution were mixed in a volume ratio of 1:2:10, resulting in a total addition of  $2.6 \text{ mL}$  of the bispyrazolone – pyrazolone – isonicotinic acid solution.



**Fig. 2.** Effects of the volume ( $V$ ) of bispyrazolone solution on the absorbance ( $A$ ) and second-order derivative peak current ( $i_p''$ )



**Fig. 3.**  $A-t$  curves of systems: I – isonicotinic acid–pyrazolone, II – isonicotinic acid–pyrazolone–bispyrazolone

To further explore the mechanism of bispyrazolone, the time – scan function of the spectrophotometer [11] was utilized to investigate the absorbance – time ( $A-t$ ) curves of System I (isonicotinic acid – pyrazolone) and System II (isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone) within 120 min. As depicted in Figure 3, the significant decrease of  $A$  over time after 70 min in system I, indicative of the blue dye’s instability, can be attributed to the oxidation and decolorization of the dye caused by residual  $\text{HClO}$  from the chlorination process. In contrast, in System II,  $A$  decreases slightly only after 95 min, and the  $A_{\text{max}}$  value of System II is significantly higher than that of System I, with a longer duration of  $A_{\text{max}}$ . Thus, the introduction of bispyrazolone can effectively inhibit the decomposition of the blue dye, enabling synchronous increases in  $A$  and  $i_p''$  (Fig. 2).

It has been reported that in the Konig reaction, pyrazolone not only participates in the condensation process but also eliminates the oxidative decolorization effect of  $\text{HClO}$  on blue dyes through its reaction with  $\text{HClO}$ . However, an excess of pyrazolone also lead to a reduction in  $\text{CNCl}$  [12], subsequently decreasing the sensitivity of the method. The optimal concentration of pyrazolone chosen in the experiment was  $0.20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ . The significant decrease in  $A$  value in System I when  $t > 70$  min indicates that  $\text{HClO}$  still remains in the system. However, in System II, with an additional  $8.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  of bispyrazolone, the  $A$  value is higher and more stable, suggesting that trace amounts of bispyrazolone can further reduce residual  $\text{HClO}$  while avoiding the negative impact of excessive pyrazolone on sensitivity, thus providing both stabilizing and sensitizing effects.

With the reaction time fixed at 60 min, the effect of temperature on  $i_p''$  was investigated within the range of  $18-55 \text{ }^\circ\text{C}$ . The results show that  $i_p''$  increases with temperature when below  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , reaches a maximum and remains stable within the range of  $30-45 \text{ }^\circ\text{C}$ , and then decreases with further increases in temperature above  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . This suggests that an increased temperature significantly accelerates the rate of the Konig reaction, however, excessively high temperatures can expedite the decomposition of blue dyes. Consequently, a reaction temperature of  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  was selected for the Konig reaction in this experiment.

The effect of scan rate ( $\Delta E/t$ ) on  $i_p''$  was investigated within the range of  $-300$  to  $-900 \text{ mV/s}$  (at intervals of  $100 \text{ mV/s}$ ). As shown in Figure 4,  $i_p''$  significantly increases with the increase in  $|\Delta E/t|$  within the range of  $-300$  to  $-700 \text{ mV/s}$ , reaching a maximum at  $\Delta E/t = -700 \text{ mV/s}$ , and then slightly decreases with further increases in  $|\Delta E/t|$ . Therefore, a scan rate of  $-700 \text{ mV/s}$  was selected.

**Linear Range and Detection Limit of the Method.** A good linear relationship was observed between  $i_p''$  and cyanide ( $\text{CN}^-$ ) concentrations ranging from  $0.00, 0.32, 0.80, 2.00, 5.00, 10.0, 20.0, 40.0, \text{ to } 60.0 \text{ } \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . With the cyanide concentration ( $\rho, \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) as the horizontal axis and  $i_p''$  (nA) as the vertical axis, the linear equation was derived as  $i_p'' = 20.96\rho + 3.00$ , with a correlation coefficient  $R^2 = 0.9991$ . At a given confidence level of 95%, the limit of detection (LOD) is calculated as  $\text{LOD} = 4.6S_b/K$ , where  $S_b$  is the standard deviation of  $i_p''$  obtained from 20 measurements of reagent blanks, and  $K$  is the slope of the linear equation. Given  $S_b = 0.36 \text{ nA}$  and  $K = 20.96$ , the LOD can be calculated as  $\text{LOD} = 4.6 \cdot 0.36 / 20.96 = 0.08 \text{ } \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . Following the convention of using 4 times LOD as the lower limit of quantitation (LOQ), the LOQ is determined to be  $0.32 \text{ } \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , which is one-fiftieth of that achieved by the isonicotinic acid-pyrazolone spectrophotometric method [6]. The linear range (LR) of this method spans from  $0.32$  to  $60 \text{ } \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ .

**Mechanism of Polarographic Analysis.** A CV analysis was conducted on the reaction products. A peak appeared during the negative scan, while no peak was observed during the positive scan. Additionally, the peak current decreased with increasing scan cycles, indicating the irreversible nature of the polarographic wave. The mercury column height ( $h$ ) exhibited a good linear relationship with  $i_p''$  within the range of  $10.6$  to  $33.0 \text{ cm}$ , with a correlation coefficient

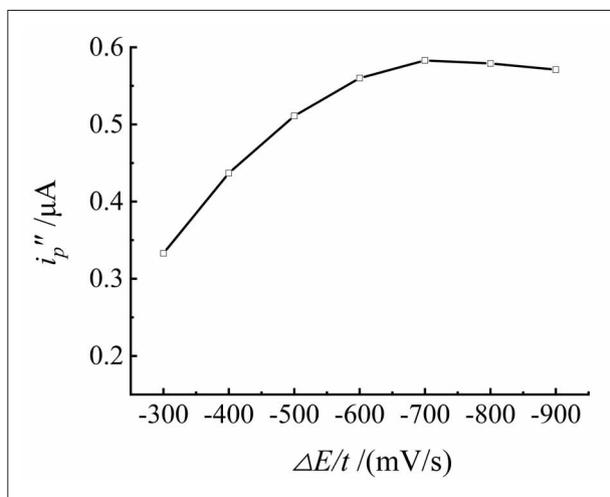


Fig. 4. Effects of scanning rate ( $\Delta E/t$ ) on  $i_p''$

$R^2=0.9972$ , consistent with the adsorption current formula  $i_a = kh$ . Upon adding small amounts of cetylpyridinium bromide, emulsifier OP, and sodium dodecyl sulfate, the polarographic wave decreased significantly or even disappeared, in line with the relationship between adsorption waves and surfactants. Within the temperature range of 26 to 30 °C,  $i_p''$  decreased with increasing temperature, with a temperature coefficient of -0.42%, conforming to the relationship between adsorption current and temperature. In summary, the effects of  $h$ , surfactants, and temperature on  $i_p''$  all indicate that this polarographic wave exhibits characteristics of an adsorption wave. The half-peak width of the non-derivative wave was measured as  $W_{1/2}=48.0$  mV at 25 °C. Using the known formula for irreversible waves  $W_{1/2}=2.446RT/(anF)$  [13], we calculated

$an = 1.31$ . With the constant  $a=0.58$ , the electron transfer number  $n$  was calculated as 2.26, which approximates 2. The peak potential ( $E_p$ ) of this polarographic wave shifted negatively with increasing pH. Over the pH range of 6.1 to 7.6, the relationship was given by  $E_p = -0.0856pH - 0.182$  ( $R^2=0.9980$ ), yielding  $dE_p/dpH = -0.0856$ . From this, the proton transfer number  $m$  was calculated as 1.9, approximating 2. Based on the electron and proton transfer numbers, the electrode reaction mechanism of the blue dye product was inferred. A carbonyl group on the pyrazolone moiety of the blue dye accepts two electrons and two protons, reducing to a hydroxyl group on the dropping mercury electrode, resulting in a reversible polarographic wave.

**Sample Analysis.** The cyanide content in mineral water, tap water, well water, and river water were analyzed, with each sample being measured in parallel for three times. The results are shown in Table 1. The results indicate that the recovery rate of the method ranges from 96.7% to 107%, and the relative standard deviation (RSD) is less than 4.5%. This method exhibits high accuracy and precision. The high precision suggests that the method has good reproducibility, while both high accuracy and good reproducibility indicate that this method is suitable for the determination of trace amounts of cyanide in water.

**Method Comparison.** A comparison of the detection limit and measurement range of this method with other cyanide detection methods reported in the literature is presented in Table 2. As shown in Table 2, the current national standard methods for cyanide detection (HJ 484–2009,

Analysis result of different samples

Table 1

Sample	Detected	Added	Recovery (%)	RSD (%)
	$\mu g \cdot L^{-1}$	$\mu g \cdot L^{-1}$		
Mineral water	0.34	0.15	107	4.5
	0.32	0.30	103	
	0.35	0.60	98.3	
Tap water	4.16	2.00	97.0	2.4
	4.12	4.00	98.8	
	4.21	8.00	102	
Well water	12.1	6.00	96.7	1.7
	12.1	12.0	97.5	
	12.2	24.0	101	
River water	25.4	12.0	102	1.4
	24.9	14.0	97.1	
	25.6	48.0	99.0	

Table 2

Comparison of different methods for cyanide detection

Method	LOD	LR	References
	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	
Isonicotinic acid – pyrazolone spectrophotometry	4	16~250	[8]
Isonicotinic acid – barbituric acid spectrophotometry	1	4~450	[8]
Headspace – gas chromatography (GB 5009.36-2016)	1	2~100	[14]
Headspace – gas chromatography (with NaClO)	0.2	0.4~80	[15]
Continuous flow injection spectrophotometry	0.2	2~200	[5]
Continuous flow injection amperometry	0.2	0.6~80	[16]
Ion chromatography	0.15	1~30	[17]
Capillary electrophoresis – laser induced fluorescence	0.1	0.4~13	[18]
Isonicotinic acid–pyrazolone–bispyrazolone polarography	0.08	0.32~60	This work

GB 5009.36–2016) are unable to accurately measure trace amounts of cyanide with concentrations below  $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . By improving the standard methods or adopting advanced instrumentation, the sensitivity can be enhanced, allowing the LOD and LOQ for cyanide to be reduced below  $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . The LOD of this method is slightly lower than that of capillary electrophoresis – laser – induced fluorescence, significantly lower than that of headspace – gas chromatography (with NaClO as the derivatizing agent), continuous flow injection spectrophotometry, continuous flow injection amperometry, and ion chromatography, but higher than that of gas chromatography – mass spectrometry. It can be seen that only the gas chromatography – mass spectrometry method based on 2-(dimethylamino)-ethylthiol-CN<sup>-</sup> derivatives exhibits better sensitivity than this method. However, compared to it, this method offers simpler operation, lower equipment cost, and a wider linear range.

### Conclusion

This work has developed a novel method for the determination of trace cyanide in water using isonicotinic acid – pyrazolone – bispyrazolone polarography. By replacing spectroscopic analysis with polarographic analysis and adding bispyrazolone to inhibit product decomposition, the detection limit for cyanide has been reduced to one-fiftieth the detection limit of isonicotinic acid–pyrazolone spectrophotometry (HJ 484-2009). This method offers advantages such as operation simplicity, high accuracy, good reproducibility, and does not require expensive equipment. In addition, the mechanism of bispyrazolone and polarographic analysis study provides a theoretical basis for further cyanide analysis research.

*This study is financially supported by the Key Project of Liaoning Provincial Education Department (JYTZD2023191), the Doctoral Research Initiation Fund of Liaoning University of Science and Technology (2307B12), and the Research Team for New Chemical Materials and Chemical Pollutant Control (XKT202302).*

### References

- Bai C.B., Zhang J., Qin Y.X., Huang H.N., Xia Z.N., Zheng Q.J., Dai H.L., Lu P.K., Miao H., Qu C.Q., Qiao R. Precise probe design based ES IPT coupled AIE mechanism toward endogenous cyanide in food detection and bioimaging // Chem. Eng. J. 2022. V. 443. Article No. 136445. doi: 10.1016/j.cej.2022.136445
- Jaramillo-Fierro X., Ramón, J., Valarezo E. Cyanide removal by ZnTiO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UVB system: a theoretical-experimental approach // Int. J. Mol. Sci. 2023. V. 24. Article No. 16446. doi: 10.3390/ijms242216446
- Drikas M., Routley B.I. Spectrophotometric method for the determination of total cyanide in wastewater samples // Analyst. 1988. No. 113. P. 1273–1276. doi: 10.1039/AN9881301273
- Huang D.Y., Peng Y.K., Yan J. Detection of cyanide in pollution – free livestock product breeding water by ion chromatography // Asian Agricultural Research. 2018. No. 10. P. 34–36. doi: 10.22004/ag.econ.271661
- Yu J.M., Sha X.L., Zhu B.Q., Qin Y.P., Shi Y.D. Determination of cyanide and volatile phenol in almond by continuous flow injection spectrophotometry // Physical Testing and Chemical Analysis (Part B:Chemical Analysis). 2023. No. 6. P. 678–682 (in Chinese). doi: 10.11973/lhyy-hx202306010
- Du H.F., Xiang S.X., Yin D.G., Wang D. Determination of cyanides in foods and water by single – sweep polarography // Chinese Journal of Food Hygiene. 2004. No. 4. P. 339–341 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1004-8456.2004.04.012
- Li X.H., Liu H.J., Xu Y.G. Rapid Determination of Cyanide in Water by Spectrophotometry with Intermediate

Product of Unstable Konig System // Chemical Reagents. 2022. No. 6. P. 915–919 (in Chinese). doi: 10.13822/j.cnki.hxsj.2022008888

8. Ministry of Environmental Protection. Water quality – Determination of cyanide – Volumetric and spectrophotometry method: HJ 484–2009. Beijing: China Environmental Science Press. 2009–09–27.

9. Tian Y.S., Li X.H., Liu H.J. Determination of trace cyanide in water by isonicotinic acid – barbituric acid polarography // Chinese Journal of Analysis Laboratory. 2016. No. 2. P. 201–203 (in Chinese). doi: 10.13595/j.cnki.issn1000–0720.2016.0047

10. Guo Z., Zhang W.D., Sun S.P., Hu Z.F., Yin L. Study on the determination of cyanide by oscilloscopic polarography // Journal of analytical science. 2005. No. 1. P. 109–110 (in Chinese).

11. Tian Y.S. The rapid measurement of cyanide in water using the real – time scanning function of the spectrophotometer // Chinese Journal of Analysis Laboratory. 2015. No. 11. P. 1333–1335 (in Chinese). doi: 10.13595/j.cnki.issn1000–0720.2015.0291

12. Epstein J. Estimation of microquantities of cyanide // Analytical Chemistry. 1947. No. 4. P. 272–274. doi: 10.1021/ac60004a018

13. Gan Z.X., Chen L.L., Cao G.Y., Zhang Z.X. Investigations on polarography with linearly changing potential-VII. On the theory for the adsorptive – complex

irreversible waves with the CAEM mechanism // Acta Chimica Sinica. 1989. No. 1. P. 78–83 (in Chinese).

14. China Food and Drug Administration. National Food Safety Standard–Determination of Cyanides in Foods: GB 5009.36-2016. Beijing: Standards Press of China. 2016–12–23.

15. Zuo J.X., Fan X., Li X. Zou T. Determination of cyanide and cyanogen chloride in drinking water by headspace-gas chromatography // Analytical Instrumentation. 2023. No. 5. P. 36–40 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1001–232x.2023.05.008

16. Zhang H., Tang Y., Jiang J. Quantitative determination of cyanide residues in polysaccharide – protein conjugate vaccines based on flow injection analysis (FIA) with amperometric detector // Chinese Journal of Biologicals. 2023. No. 3. P. 352–356 (in Chinese). doi: 10.13200/j.cnki.cjb.003836

17. Shi Y., Zhang R., Wu Z., Wu X. Determination of cyanide in cyanide slag from gold smelting by nitroge blowing bath and ion chromatography // Metallurgical Analysis. 2023. No. 8. P. 79–85 (in Chinese). doi: 10.13228/j.boyuan.issn1000-7571.012055

18. Zhang Q., Maddukuri N., Gong M. A direct and rapid method to determine cyanide in urine by capillary electrophoresis // Journal of Chromatography A. 2015. No. 1414. P. 158–162. doi: 10.1016/j.chroma.2015.08.050

## Фиторекультивация техногенных ландшафтов с использованием растений рода *Salix* L.

© 2024. Е. Н. Теребова<sup>1</sup>, к. б. н., доцент,  
Н. В. Орешникова<sup>2</sup>, к. б. н., доцент,  
М. А. Павлова<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Петрозаводский государственный университет,  
185910, Россия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, д. 33,

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
119991, Россия, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1,  
e-mail: eterebova@gmail.com

Исследован фиторемедиационный потенциал видов рода *Salix* L. (Ивы) при рекультивации промышленной свалки комбината ОАО «Карельский окатыш», на территории которой в 2014 г. была создана плантация с использованием 7 видов рода *Salix*. Техногенный грунт ландшафта был загрязнён железом до 56 г/кг и беден основными макро- и микроэлементами. В течение 4 лет проводился анализ биоморфологических (рост, масса органов), физиологических показателей (содержание фотосинтетических пигментов, состав клеточной стенки листа) и накопления металлов (коэффициент биологического поглощения металлов (КБП)) растений ивы. Установлено, что максимальную приживаемость после посадки имели виды *S. schwerinii* (93%), *S. phylicifolia* (80%), *S. viminalis* (70%). Содержание фотосинтетических пигментов и специальный листовой индекс (SLA) листа *S. phylicifolia*, и *S. schwerinii* позволили оценить фотосинтетическую функцию растений, как оптимальную. Средний ряд накопления металлов (КБП) целым растением видов рода *Salix* следующий: Zn (31,92) > Cd (11,83) > Mn (5,10) > Pb (4,64) > Cu (4,40) > Cr (1,47) > Co (1,45) > Li (0,41) > Fe (0,17). За счёт высокой ионообменной способности клеточной стенки листа ив (1120–2050 мкмоль/г сух. кл. ст.) металлы могут связываться в организме растений. Ивы и в дальнейшем будут выполнять функцию облесения техногенной территории, создавать условия для развития продуктивного лесного фитоценоза.

**Ключевые слова:** фиторекультивация, *Salix*, металлы, железорудное производство, клеточная стенка, рост, фотосинтетические пигменты, коэффициент биологического поглощения.

## Phytoremediation of technogenic landscapes using plants of the genus *Salix* L.

© 2024. E. N. Terebova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6556-9132<sup>2</sup>

N. V. Oreshnikova<sup>2</sup> ORCID: 0009-0006-0436-6538<sup>2</sup>

M. A. Pavlova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2326-4044<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Petrozavodsk State University,

33, Lenin St., Petrozavodsk, Russia, 185910,

<sup>2</sup>Moscow State University,

1, Leninskie Gory St., Moscow, Russia, 119991,

e-mail: eterebova@gmail.com

The phytoremediation potential of species of the genus *Salix* L. (Willow) was studied during the remediation of the industrial landfill of the OJSC “Karelsky Okatysh”. A plantation was created at this landfill in 2014. 7 species of the genus *Salix* were used for this purpose. The technogenic soil of the landscape was contaminated with iron up to 56 g/kg and was poor in basic macro- and microelements. Biomorphological (growth, organ weight) and physiological indicators (photosynthetic pigments content, leaf cell wall composition), as well as metal accumulation (biological absorption coefficient of metals (BAC)), were analyzed for willow plants during 4 years. We found that *S. schwerinii* (93%), *S. phylicifolia* (80%), and *S. viminalis* (70%) had the maximum survival rate after planting. The photosynthetic pigments content and the special leaf index (SLA) of *S. phylicifolia* and *S. schwerinii* leaves allowed us to evaluate the photosynthetic function of plants as optimal in conditions of soil iron contamination and a lack of macro-microelements. The average series of metal accumulation by a whole plant in species of the genus *Salix* is as follows: Zn (31.92) > Cd (11.83) > Mn (5.10) > Pb (4.64) > Cu (4.40) > Cr (1.47) > Co (1.45) > Li (0.41) > Fe (0.17). Due to the high ion exchange capacity of the

willow leaf tissues cell wall (1120–2050  $\mu\text{mol/g}$  of dry cell wall weight), metals can bind in the plant body. Phenolic and pectin substances dominate in the structure of the cell wall of willow leaves. Willows will continue to perform the function of afforestation of technogenic territory and create conditions for the development of a productive forest phytocenosis.

**Keywords:** phytoremediation, *Salix*, metals, iron ore production, cell wall, growth, photosynthetic pigments, biological absorption coefficient.

Одной из значимых проблем нашего времени является техногенное загрязнение окружающей среды, которое обусловлено различными явлениями и факторами, в частности антропогенной деятельностью. Следствием техногенного воздействия является накопление в почвах и грунтах значительного количества загрязняющих веществ (ЗВ), в частности таких токсичных поллютантов, как тяжёлые металлы (ТМ). В последние годы всё более широкое признание получает метод фиторемедиации, направленный на снижение токсичности и доступности ТМ посредством депонирования поллютантов растениями из среды их обитания [1, 2]. В связи с этим оценка уровня загрязнения нарушенных антропогенных территорий, а также выбор методов очистки и восстановления весьма актуальны.

Почвы выполняют свои экологические функции в отношении других природных образований: удерживая поллютанты, защищают подземные воды, связывая соединения в малоподвижные и недоступные растениям формы, предотвращают попадание токсичных веществ. Техногенные почвы формируются под влиянием промышленной деятельности человека. Часто они сочетаются с непочвенными образованиями – участками техногенных и природных грунтов. Однако, выполняя защитную роль, почвы постепенно накапливают ЗВ, становясь на определённом этапе непригодными для дальнейшего использования, нуждающимися в очищении. В этом случае на помощь приходит фиторекультивация – биологический этап рекультивации, направленный на восстановление загрязнённых почв посредством растительности. В ходе рекультивации конструируются почвоподобные тела (технозёмы), состоящие из одного или нескольких насыпных слоёв и поверхностного плодородного слоя. Слои технозёмов насыпные, следовательно, генетически не связаны, что отличает их от природных почв. Однако технозёмы обладают определёнными экологическими функциями: продукционными, сорбционными и водно-миграционными [3].

Для лесовосстановления и фитоэкстракции ЗВ из загрязнённых грунтов техногенных территорий активно используются растения

рода *Salix* L. (Ива) [4]. Это обусловлено биологическими и физиологическими особенностями ивы. Виды р. *Salix* отличаются значительным генотипическим полиморфизмом и большой амплитудой изменчивости особей [5]. Проводящие органы ивы характеризуются высокими показателями водного обмена [6], отмечена устойчивость к кавитации ксилемы [7], засухоустойчивость, газоустойчивость [8] и повышенный газообмен, позволяющий ивнякам поглощать до 11 т/га углекислого газа [9]. Также установлена высокая интенсивность фотосинтеза листа [10], связанная с повышенной устьичной проводимостью ассимиляционного аппарата [7]. Такая физиологическая активность ив позволяет им накапливать элементы в тканях и органах в высоких концентрациях и обеспечивать фитоэкстракцию поллютантов из среды. Однако в зависимости от уровня и типа загрязнения почвы, фазы онтогенеза, особенностей метаболизма и вида растений, распределение и накопление ТМ по растению ивы очень варьирует.

Цель работы – оценить фиторемедиационный потенциал (биоморфологические, физиологические показатели и накопление металлов) у видов рода *Salix* при рекультивации техногенных ландшафтов ОАО «Карельский окатыш».

### Объекты и методы исследования

ОАО «Карельский окатыш» добывает и перерабатывает железную руду.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_x\text{O}_y$ , пылевые выбросы, содержащие металлы – основные поллютанты комбината. Содержание Fe, Cr, Mn, Pb, Zn, Cu, Sr в аэрогенной пыли установлено на уровне 1–0,1 мг/г. В 2020 г. выбросы ЗВ в г. Костомукше составили 81337 [11].

В июне 2014 г. на промышленной территории комбината ОАО «Карельский окатыш», (64°38'27.9" с. ш., 30°45'54.9" в. д.; 64°38'26.1" с. ш., 30°46'03.0" в. д.; 64°38'29.3" с. ш., 30°46'11.5" в. д.; 64°38'28.7" с. ш., 30°46'14.2" в. д.) Республики Карелия, СЗФО, являющейся бывшей промышленной свалкой (3 га), были высажены разные виды рода *Salix* L.: *Salix myrsinifolia* Salisb., *S. phylicifolia* L.,



**Рис. 1.** Фиторемедиационная плантация 1 год эксперимента (фото Е.Н. Теребова)  
**Fig. 1.** Phytoremediation plantation, the 1st year of the experiment (photo by E.N. Terebova)

*S. viminalis* L., *S. alba* L., *S. acutifolia* Willd. и проходящие испытание на фиторемедиационную способность в других странах гибрид *S. schwerinii* × *S. viminalis* (variety *Karin*) и вид *S. schwerinii* E.L. Wolf. В итоге была создана фиторемедиационная плантация ивы.

Род *Salix* относится к семейству *Salicaceae* (Ивовые). Род включает в себя порядка 400 видов деревьев, кустарников, кустарничков. Наиболее распространены ивы в северных областях Евразии и Северной Америки, в горах Китая. Образуют ивовые леса и кустарниковые заросли по берегам водоёмов, в ложбинах, оврагах и котловинах, на болотах, в альпийском и субальпийском поясах гор, в лесотундре и тундре. В лесной зоне встречаются в различных изменённых деятельностью человека местообитаниях. Ивы – гелиофиты, гигромезофиты. Высота растения достигает в среднем 15 м, редко до 40 м. Растения образуют обильную корневую поросль с образованием придаточных корней.

Растения ивы сажались черенком, размером 15–20 см, в техногенный субстрат, на расстоянии 0,5 м друг от друга и 3 м между рядами (рис. 1–3). Промышленная территория перед посадкой очищалась от мусора (стекло,

металл, резина, пластик) и засыпалась слоем торфа (до 5 см). Далее в течение месяца после посадки растения поливали два раза в неделю с помощью пожарных машин.

В сентябре 2014 г. (первый год эксперимента, после трёх месяцев выращивания посаженных растений) и в сентябре 2015 г. (второй год эксперимента, после года выращивания) отбирали растительные пробы и грунт на определение содержания металлов, проведение биометрических и физиологических исследований растений. В сентябре 2017 г. (четвёртый год эксперимента, после четырёх лет выращивания) оценивали содержание металлов в тканях и органах растений, грунтах. В работе представлены данные по трём видам ивы: аборигенным видам *S. phylicifolia* и *S. viminalis* (произрастают на территории Республики Карелия) и адвентивному виду *S. schwerinii* (не произрастает на территории Республики Карелия), который считается перспективным для фиторемедиации [10].

**Методы исследования.** Оценивали ростовые показатели растений, содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a*, *b* и каротиноидов) листа спектрофотометрическим методом (спектрофотометр Спектр



Рис. 2. Фиторемедиационная плантация, 4 год эксперимента (*S. schwerinii*) (фото Е.Н. Теребова)  
 Fig. 2. Phytoremediation plantation, the 4th year of the experiment (*S. schwerinii*) (photo by E.N. Terebova)



Рис. 3. Фиторемедиационная плантация, 11 год эксперимента (2024)  
 Fig. 3. Phytoremediation plantation, the 11th year of the experiment (2024)

2001) [12]. Состав клеточной стенки листа определяли методом потенциометрического титрования [14]. Металлы в растениях и грунтах определяли атомно-абсорбционным методом (спектрофотометр AA-7000 (Shimadzu, Япония). Отбирали по 10 растений ивы каждого вида, делили их на корни, листья и побеги и определяли отдельно в органах содержание металлов. В работе представлены средние арифметические валовых значений содержания элементов в грунте и коэффициенты биологического поглощения металлов целым растением (листья+корни+побеги). Коэффициент биологического поглощения (КБП) металлов характеризует способность растений поглощать металлы из среды. Его рассчитывали как отношение содержания металла в растении к его содержанию в грунте. Грунт отбирали непосредственно в зоне

корней растений. Содержание азота, фосфора, углерода в грунтах определяли по методикам [13, 15]. Достоверность полученных результатов оценивали с помощью критерия Фишера (Fisher's LSD test) с учётом объёма сравниваемых совокупностей и порога доверительной вероятности 0,95 (программа Statgraphics 2.1 для Windows).

### Результаты и обсуждение

**Элементный состав грунта фиторемедиационной территории.** Первичный анализ содержания элементов в грунте фиторемедиационной территории показал, что грунт беден азотом, углеродом, фосфором, а содержание металлов ниже контрольных значений, характерных для незагрязнённых лесных почв, за исключением железа (табл. 1), содержание

которого в грунте территории превышает контрольные значения и составляет 1,5 ПДК.

В ходе эксперимента были выявлены высокие коэффициенты вариации по содержанию металлов, что свидетельствует о гетерогенности почвенных условий фиторемедиационной плантации, то есть растения ивы были высажены в субстрат, загрязнённый железом и обеднённый макро- и микроэлементами.

**Биоморфологические показатели растений.** После года выращивания растений ивы на плантации оценили приживаемость растений в процентах. Установлено, что максимальная приживаемость у адвентивного вида

*S. schwerinii* (93%), минимальная – у гибрида *S. schwerinii* × *S. viminalis* (variety *Karin*) (40%). Аборигенные виды *S. myrsinifolia* (60%), *S. phyllicifolia* (80%), *S. viminalis* (70%) имели также высокие показатели приживаемости. У других видов *S. alba* и *S. acutifolia* приживаемость оценить не удалось. На основании этого в работе представлены биоморфологические данные по трём видам ивы: *S. phyllicifolia*, *S. viminalis* и *S. schwerinii*.

Анализ ростовых показателей видов ивы свидетельствует, что наибольшие биоморфологические характеристики наблюдаются у *S. phyllicifolia* и *S. schwerinii*. Так, после года

Таблица 1 / Table 1

pH и содержание элементов в грунте фиторемедиационной территории, 1 год эксперимента  
pH and element content in the soil of the phytoremediation area, the 1st year of the experi

Показатель Index	pH <sub>вод.</sub> pH <sub>water</sub>	pH <sub>KCl</sub>	C <sub>опр.</sub> C <sub>орг.</sub>	N	P	Li	Cd	Pb	Ni	Cu	Zn	Fe
	%			мг/кг / mg/kg								
Ср. значение Aver. value	6,35	4,97	9,61	0,19	0,07	3,89	0,07	2,45	11,99	7,80	13,46	55230,37
Min	–**	–	7,69	0,10	0,05	2,66	0,03	0,79	8,31	6,39	8,75	16334,21
Max	–	–	13,12	0,37	0,11	4,31	0,10	8,16	20,71	9,54	24,17	70129,85
CV, %	–	–	–	–	–	0,57	0,06	16,05	21,30	1,63	17,54	60,00
Фон* Background*	4,90	4,00	45,70	2,17	0,10	–	0,5	16	28	19	37	17505
ПДК* / MPC*	–	–	–	–	–	–	3	32	50	100	300	38000

Примечание: \*ПДК и фон – предельно допустимая и фоновая концентрация металлов в серых лесных почвах Карелии [16], \*\* – прочерк означает отсутствие данных.

Note: \*MPC and background – maximum permissible and background metal content in grey forest soils of Karelia [16], \*\* – a dash means no data.

Таблица 2 / Table 2

Биометрические показатели разных видов рода *Salix*  
Biometric indicators of different species of the genus *Salix*

Длительность эксперимента Duration of the experiment	Длина корня, см Root length, cm	Длина побегов, см Shoot length, cm	Кол-во побегов, шт. Shoot number, pc	Кол-во лист/ побег, шт. Leaves/shoot number, pc	Масса сухая 10 листьев, г Dry weight of 10 leaves, g	Площадь листьев мм <sup>2</sup> Leaves area, mm <sup>2</sup>
<i>S. schwerinii</i>						
1 год / 1 <sup>st</sup> year	13,4±6,4	25,5±11,3	4±1	23±8	1,30±0,41	866±323
2 год / 2 <sup>nd</sup> year	20,2±13,4 <sup>b*</sup>	68,0±33,0 <sup>a</sup>	18±2 <sup>a</sup>	–**	1,02±0,17 <sup>c</sup>	1355±420 <sup>a</sup>
<i>S. phyllicifolia</i>						
1 год / 1 <sup>st</sup> year	20,6±6,5	21,5±11,7	4±1	15±5	0,57±0,35	1134±470
2 год / 2 <sup>nd</sup> year	39,7±4,4 <sup>a</sup>	54,3±13,1 <sup>a</sup>	15±3 <sup>a</sup>	–	1,57±0,12 <sup>a</sup>	1650±630 <sup>a</sup>
<i>S. viminalis</i>						
1 год / 1 <sup>st</sup> year	15,8±6,5	20,1±10,7	5±2	38±7	0,35±0,01	498±120
2 год / 2 <sup>nd</sup> year	21,7±7,6 <sup>b</sup>	42,6±14,1 <sup>b</sup>	10±2 <sup>b</sup>	–	0,40±0,02 <sup>b</sup>	585±196 <sup>b</sup>

Примечание: \* – для 2 года эксперимента, значения с разными индексами (a, b, c) достоверно отличаются относительно других значений в столбцах, согласно Fisher’s LSD test (p < 0,05); \*\* – прочерк означает отсутствие данных.

Note: \* – the values with different indexes (a, b, c) are significantly different relative to other values in the 2<sup>nd</sup> year of the experiment, according to Fisher’s LSD test (p < 0.05); \*\* – a dash means no data.

Таблица 3 / Table 3

Содержание фотосинтетических пигментов и показатель SLA у разных видов рода *Salix* (средние значения за 1–2 годы эксперимента) / Photosynthetic pigments content and SLA index in different species of the genus *Salix* (average values for the 1–2 years of the experiment)

Вид растений Species	SLA, мм <sup>2</sup> /мг mm <sup>2</sup> /mg	Содержание пигментов, мг/г сухой массы Pigment content, mg/g of dry weight				
		Общее Total	Хорофилл <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	Хлорофилл <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>	Каротиноиды Carotenoids	<i>a/b</i>
<i>S. schwerinii</i>	2,16±1,73 <sup>a</sup>	1,89±0,21 <sup>b</sup>	1,10±0,11 <sup>b</sup>	0,61±0,09 <sup>a</sup>	0,18±0,02 <sup>b</sup>	1,80±0,07 <sup>b</sup>
<i>S. phylicifolia</i>	2,20±3,41 <sup>a</sup>	2,25±0,55 <sup>a</sup>	1,22±0,25 <sup>a</sup>	0,78±0,05 <sup>a</sup>	0,25±0,08 <sup>a</sup>	1,56±0,02 <sup>a</sup>
<i>S. viminalis</i>	1,33±2,07 <sup>b</sup>	1,68±0,15 <sup>b</sup>	0,96±0,14 <sup>b</sup>	0,58±0,18 <sup>a</sup>	0,14±0,07 <sup>b</sup>	1,70±0,04 <sup>b</sup>

Примечание: \* – значения с разными индексами (*a*, *b*, *c*) достоверно отличаются относительно других значений в столбцах, согласно Fisher's LSD test ( $p < 0,05$ ).

Note: \* – the values with different indexes (*a*, *b*, *c*) are significantly different relative to other values, according to Fisher's LSD test ( $p < 0.05$ ).

Таблица 4 / Table 4

Коэффициент биологического поглощения (КБП) металлов (целым растением) у видов рода *Salix* / Biological absorption coefficient (BAC) of metals (whole plant) in species of the genus *Salix*

Год эксперимента Year of the experiment	Li	Cd	Pb	Co	Ni	Cu	Cr	Zn	Mn	Fe
<i>S. schwerinii</i>										
1	0,45	20,48	8,44	1,19	1,15	1,76	1,26	31,37	1,71	0,16
2	0,25	16,93	1,70	1,21	1,00	6,01	1,19	67,48	6,49	0,09
4	–	12,47	3,5	1,8	0,78	4,5	2,14	12,01	7,85	0,21
<i>S. phylicifolia</i>										
1	0,34	20,30	13,21	1,86	1,23	1,18	1,01	47,09	3,03	0,08
2	0,18	5,92	1,50	1,75	0,59	11,91	0,50	34,03	4,10	0,05
4	–	10,54	2,9	1,6	0,69	6,43	1,89	10,70	6,21	0,31
<i>S. viminalis</i>										
1	2,40	15,64	8,72	1,85	1,65	5,08	3,14	68,27	12,01	0,45
2	0,08	0,30	0,48	0,13	0,39	0,65	0,32	8,18	1,12	0,03
4	–	3,85	1,3	1,70	0,74	2,05	1,78	8,12	3,41	0,19
Ср. значение Aver. val.	0,41	11,83	4,64	1,45	0,91	4,40	1,47	31,92	5,10	0,17

выращивания наибольшей длина корня была у *S. phylicifolia* и составила 39,7±4,4 см. Также растения *S. phylicifolia* и *S. schwerinii* имели максимальное, по сравнению с *S. viminalis*, количество побегов – 15–18 шт./побег и площадь листьев 1355–1650 мм<sup>2</sup> (табл. 2).

**Содержание фотосинтетических пигментов в листе растений.** Фотосинтетическая функция растений является основой продуктивности. Оценить её позволяет анализ содержания фотосинтетических пигментов. Чем выше продуктивность растений, тем интенсивнее пластический обмен и синтез специальных метаболитов – фитохелатинов, компонентов клеточной стенки (углеводов, белков, фенолов), которые непосредственно депонируют металлы и участвуют в клеточных механизмах детоксикации поллютантов [17].

Полученные нами значения фотосинтетических пигментов листа ивы укладываются в известный диапазон пигментов, который может изменяться от 2,69±0,02 до 8,31±0,05 мг/г. При этом самые высокие значения были отмечены для листа *S. viminalis* в пойме р. Оби, по которым *S. viminalis* приближается к светолюбивым видам. Отношение хлорофилла *a* к *b* (*a/b*) может колебаться у разных видов в среднем от 1,39±0,03 до 3,63±0,05 [18].

Виды ивы фиторемедиационной плантации отличались содержанием фотосинтетических пигментов в листе. Максимальные уровни пигментов установлены у *S. phylicifolia*, меньше – у *S. schwerinii* и минимальные – у *S. viminalis*. Показатель SLA – специальный листовой индекс, который позволяет косвенно оценить способность к фотосинтезу у растений.

Рассчитывается как отношение площади листа к его массе в мм<sup>2</sup>/мг. Чем он больше, тем эффективнее фотосинтез растений. В ходе исследования установлено, что листья *S. phylicifolia* и *S. schwerinii* характеризуются наибольшими значениями SLA (табл. 3). Минимальное содержание пигментов в листьях *S. viminalis*, вероятно, обусловлено особенностями водного обмена вида. Данный вид наиболее устойчив к засухе [19], что может обратно коррелировать с синтезом фотосинтетических пигментов.

**Накопление металлов растениями.** Деponирование металлов, оценённое по КБП, позволило установить, что в первый год эксперимента все виды ивы активно поглощают литий, кадмий, свинец и никель (КБП больше, чем в другие годы эксперимента). Кроме этого, вид *S. viminalis* в первый год эксперимента активно накапливал цинк, марганец, медь, железо и хром (все металлы). *Salix schwerinii* и *S. phylicifolia* в целом характеризуются более интенсивным накоплением металлов, по сравнению с *S. viminalis*, в течение всего периода выращивания. В связи с тем, что грунт техногенного ландшафта обладает высокой гетерогенностью, поглощение элементов различными видами растений ивы и в разные годы варьирует. Средний ряд накопления металлов следующий: Zn (31,92) > Cd (11,83) > Mn (5,10) > Pb (4,64) > Cu (4,40) > Cr (1,47) > Co (1,45) > Li (0,41) > Fe (0,17); КБП показывает

во сколько раз содержание металла в растении больше (КБП>1) или меньше (КБП<1) содержания металла в среде обитания. Установлено, что литий плохо поглощается корнями растений. Это обусловлено его химическими особенностями: активный металл, с высоким восстановительным потенциалом, малым радиусом атома, представленный в течение выращивания в почве растворимыми соединениями. Также выявлено высокое содержание железа в грунте. Поэтому КБП этих металлов <1. Ивы накапливают элементы из среды обитания, деponируя их в своём организме (листья, ветви, ствол, корни). Существует проблема обратного возвращения части металлов в грунт с опадом ив. В связи с этим предлагается регулярно срезать ветви ивы и вывозить для дальнейшей утилизации: получения биогаза, сжигания, пиролиза [20].

**Свойства клеточной стенки листа.** Клеточная стенка клеток тканей листа и корня может деponировать металлы, связывая их своими функциональными группами (аминогруппы, карбоксильные, фенольные), составляющими структурные компоненты клеточной стенки – белки, углеводы, фенолы. Чем больше ионообменных групп в клеточной стенке, тем выше её ионообменная способность (S) [14]. Анализ состава клеточной стенки листа представлен в таблице 5. Отмечена высокая ионообменная способность (общее количество

Таблица 5 / Table 5  
Содержание ионообменных групп в клеточной стенке листа растений рода *Salix*  
Ion exchange groups content in the leaf cell wall of plants of the genus *Salix*

Вид растений Plant species	Год эксперимента Year of the experiment	Количество групп, S ± 50, мкмоль/г сух.кл.ст. Number of the groups, S ± 50, μmol/g of dry cell wall weight			
		Аминогруппы Amino groups	Карбоксильные группы Carboxyl groups	Фенольные ОН-группы Phenolic OH-groups	Общее кол-во функциональных групп Total number of the functional groups
<i>S. schwerinii</i>	1	160	560	400 <sup>a</sup>	1120 <sup>a</sup>
	2	120	450	1450 <sup>b</sup>	2020 <sup>b</sup>
<i>v. Karin</i>	1	200	820 <sup>a</sup>	400 <sup>a</sup>	1420 <sup>a</sup>
	2	250	1300 <sup>b</sup>	500 <sup>b</sup>	2050 <sup>b</sup>
<i>S. phylicifolia</i>	1	210	1086 <sup>a</sup>	280 <sup>a</sup>	1576
	2	220	580 <sup>b</sup>	820 <sup>b</sup>	1620
<i>S. alba</i>	1	200	320 <sup>a</sup>	680 <sup>a</sup>	1200 <sup>a</sup>
	2	150	550 <sup>b</sup>	900 <sup>b</sup>	1600 <sup>b</sup>
<i>S. acutifolia</i>	1	200	410 <sup>a</sup>	800 <sup>a</sup>	1410 <sup>a</sup>
	2	170	600 <sup>b</sup>	1000 <sup>b</sup>	1770 <sup>b</sup>

Примечание: \* – значения с разными индексами (a, b, c) достоверно отличаются относительно других значений у видов ив по годам выращивания, согласно Fisher's LSD test (p<0,05).

Note: \* – the values with different indexes (a, b, c) are significantly different relative to other willow species in different years of the experiment, according to Fisher's LSD test (p<0.05).

функциональных групп) клеточной стенки листа ив (1120–2050 мкмоль/г сух. кл. ст.), по сравнению с другими видами растений [21]. Также происходит увеличение ионообменной способности клеточной стенки листа у всех видов ив после года выращивания на фиторемедиационной плантации комбината.

Значимые отличия (Fisher's LSD test,  $p < 0,05$ ) после года выращивания выявлены для общего количества групп в клеточной стенке у видов *S. schwerinii*, гибрида variety *Karin*, *S. alba*, *S. acutifolia*. При этом увеличение содержания групп в структуре клеточной стенки листа всех исследованных видов ивы в течение выращивания происходит в основном за счёт увеличения количества фенольных ОН-групп и карбоксильных групп (искл. у *S. phyllicifolia*). Карбоксильные группы могут входить в состав пектиновых веществ и гидроксикоричных кислот клеточной стенки. Именно катионообменные карбоксильные группы клеточной стенки в основном связывают металлы из среды обитания растений [22]. Фенольные-ОН-группы – маркеры фенольных соединений, в основном лигнина и суберина, компонентов вторичной клеточной стенки [14]. Известна адаптивная роль фенолов в метаболизме растений, особенно в защитных механизмах. Большинство фенольных соединений обладает мощными антиоксидантными свойствами, нейтрализует последствия окислительного стресса. Некоторые из них проявляют способность хелатировать ионы ТМ, фенолпропаноиды являются исходными молекулами для синтеза лигнина и суберина, укрепляя клеточные стенки растений [23].

### Заключение

С целью фиторекультивации на промышленной территории ОАО «Карельский окатыш» была создана плантация видов растений рода *Salix* L. На фиторемедиационной территории грунт был загрязнён железом и беден основными макро- и микроэлементами растений. Виды *S. phyllicifolia* и *S. schwerinii* оказались наиболее перспективными для использования в качестве фиторемедиантов. Они показали наибольший процент приживаемости и параметры роста по сравнению с другими видами ивы. Это связано с высокими показателями фотосинтетической функции *S. phyllicifolia* и *S. schwerinii*. Растения ивы поглощали металлы из грунта, наиболее активно – цинк, кадмий, марганец, свинец, медь, хром, кобальт; менее активно – железо и литий. Связывание металлов растениями

*Salix* может происходить за счёт высокой ионообменной способности клеточной стенки листа. В условиях бедных (кроме железа) макро- и микроэлементами техногенных грунтов комбината листовая опад ивы, обогащённый металлами (фитоэкстракция поллютантов из среды обитания) и макроэлементами (собственная продукция растений) способствует формированию плодородной почвы. Можно сделать прогноз развития фиторемедиационной плантации: виды ивы и в дальнейшем будут выполнять функцию облесения техногенной территории, создавать условия для развития продуктивного лесного фитоценоза.

*Авторы выражают благодарность О.В. Крупеня и В.В. Васильевой за организацию работы на территории ОАО «Карельский окатыш», В.И. Андросовой, Э.Л. Кайбейлену, Ю.Н. Ткаченко за совместную посадку растений.*

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).*

### References

1. Shen X., Dai M., Yang J., Sun L., Tan X., Peng C., Ali I., Naz I. A critical review on the phytoremediation of heavy metals from environment: Performance and challenges // *Chemosphere*. 2022. V. 291. Pt. 3. Article No. 132979. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.132979
2. Goncharova N.V. Phytoremediation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants // *Ekologicheskiy vestnik*. 2010. No. 4. P. 5–13 (in Russian).
3. Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofieva T.V. Anthropogenic soils: genesis, geography, reclamation. Smolensk: Oikumena, 2003. 268 p. (in Russian).
4. Rodkin O.I., Tsybulko N.N. Prospects for using the phytoremediation method for deactivation of territories contaminated with radionuclides // *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2023. No. 1. P. 42–50 (in Russian). doi:10.46646/2521-683X/2023-1-42-50
5. Nedoseko O.I., Viktorov V.P. Life forms of *Salix* L. genus types in Russia // *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2018. V. 3 (2). P. 1–15 (in Russian). doi: 10.21685/2500-0578-2018-2-5
6. Kuzovkina Y.A., Volk T.A. The characterization of willow (*Salix* L.) varieties for use in ecological engineering applications: Co-ordination of structure, function and autecology // *Ecol. Eng.* 2009. V. 35. No. 8. P. 1178–1189. doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.03.010
7. Wikberg J., Ögren E. Interrelationships between water use and growth traits in biomass-producing wil-

lows // Trees. 2004. V. 18. P. 70–76. doi: 10.1007/s00468-003-0282-y

8. Kulagin A. Yu., Ishbirdin A. R., Tagirova O. V. Adaptive variability of willow white (*Salix alba* L.) in the conditions of technogenic pollution of the environment (Southern Ural region) // Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya. 2020. V. 20. No. 1. P. 90–101 (in Russian). doi: 10.18500/1816-9775-2020-20-1-90-101

9. Urazgildin R.V., Kulagin A.Yu. Structural and functional responses of woody plants to anthropogenic environmental changes: Damage, adaptations and strategies. Part 2. Effects on physiological functions // Biosfera. 2021. V. 13. No. 3. P. 101–119 (in Russian). doi: 10.24855/biosfera.v13i3.579

10. Kaybeyaynen E.L., Pelkonen P. Optimization of photosynthesis and transpiration in unseparated willow leaves on rapid regeneration plantations // Fiziologiya rasteniy. 2007. V. 54. No. 3. P. 350–355 (in Russian).

11. State report on the state of the environment of the Republic of Karelia in 2020 / Eds. A.N. Gromtsev, O.L. Kuznetsov, A.E. Kurilo, E.V. Vedentsova. Petrozavodsk, 2021. 277 p. (in Russian).

12. Mohsin M., Kuittinen S., Salam M.M.A., Peräniemi S., Laine S., Pulkkinen P., Kaipiainen E., Vepsäläinen J., Pappinen A. Chelate-assisted phytoextraction: Growth and ecophysiological responses by *Salix schwerinii* E.L Wolf grown in artificially polluted soils // J. Geochem. Explor. 2019. V. 205. Article No. 106335. doi: 10.1016/j.gexplo.2019.106335

13. Terebova E.N., Oreshnikova N.V., Pavlova M.A., Starodubtseva A.A. Application of Scots pine bark and shungite chips for growing oats (*Avena sativa* L.) in protected ground // Forestry Bulletin. 2024. V. 28. No. 2. P. 55–69 (in Russian). doi: 10.18698/2542-1468-2024-2-55-69

14. Meychik N.R., Yermakov I.P., Khonarmand S.D., Nikolaeva Y.I. Ion-exchange properties of cell walls in chickpea cultivars with different sensitivities to salinity // Russ. J. Plant Physiol. 2010. V. 57. P. 620–630. doi: 10.1134/S1021443710050043

15. Dubrovina I.A. Changes in the content of total carbon, nitrogen and phosphorus in boreal soils of the Republic of Karelia when used in agriculture // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya. 2018. No. 41. P. 27–41 (in Russian). doi: 10.17223/19988591/41/2

16. Fedorets N.G., Bakhmet O.N., Medvedeva M.V., Akhmetova G.V., Novikov S.G., Tkachenko Yu.N., Solodovnikov A.N. Heavy metals in soils of Karelia. Petrozavodsk: Karelskiy nauchnyy tsentr RAN, 2015. 222 p. (in Russian).

17. Gąsecka M.G., Mleczek M., Drzewicka K., Magdziak Z., Rissmann I., Chadzinikolau T., Golinski P. Physiological and morphological changes in *Salix viminalis* L. as a result of plant exposure to copper // J. Environ. Sci. Health A Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng. 2012. V. 47. No. 4. P. 548–557. doi: 10.1080/10934529.2012.650557

18. Ivanova N.A., Kostyuchenko R.N. Ecological and physiological mechanisms of adaptation of some species of willows in various habitat conditions on the territory of the Middle Ob region // Nizhneartovsk: Izdatelstvo Nizhneartovskogo gumanitarnogo universiteta, 2011. 163 p. (in Russian).

19. Kostyuchenko R.N. Ecological and physiological mechanisms of adaptation of some willow species in different habitat conditions on the territory of the Middle Ob region. Nizhneartovsk: Izdatelstvo Nizhneartovskogo gumanitarnogo universiteta, 2011. 163 p. (in Russian).

20. Sassner P., Mårtensson C.G., Galbe M., Zacchi G. Steam pretreatment of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-impregnated *Salix* for the production of bioethanol // Bioresour. Technol. 2008. V. 99. No. 1. P. 137–145. doi: 10.1016/j.biortech.2006.11.039

21. Terebova E.N., Markovskaya E.F., Androsova V.I. Cell wall functional activity and metal accumulation of halophytic plant species *Plantago maritima* and *Triglochin maritima* on the White Sea littoral zone (NW Russia) // Czech Polar Reports. 2020. V. 10. No. 2. P. 169–188. doi: 10.5817/CPR2020-2-14

22. Krzesłowska M. The cell wall in plant cell response to trace metals: polysaccharide remodeling and its role in defense strategy // Acta Physiol. Plant. 2011. V. 33. P. 35–51. doi: 10.1007/s11738-010-0581-z

23. Kulbat K. The role of phenolic compounds in plant resistance // Biotechnol. Food Sci. 2016. V. 80. No. 2. P. 97–108.

## Признаки хронического воздействия повышенных концентраций PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> на параметры эритроцитов у детей

© 2024. Н. В. Зайцева, д. мед. н., профессор, академик РАН, научный руководитель, М. А. Землянова, д. мед. н., профессор, зав. лабораторией, А. М. Игнатова, д. т. н., н. с., Ю. В. Кольдибекова, к. б. н., с. н. с., М. С. Степанков, н. с., Е. В. Пескова, н. с., Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, 614045, Россия, г. Пермь, ул. Монастырская, д. 82, e-mail: iamptstu@yandex.ru

Выявлены признаки воздействия повышенных концентраций частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в воздухе на морфометрические параметры эритроцитов у детей. Были выбраны две территории с одинаковыми геоклиматическими условиями, но разной экспозицией на эти частицы. Концентрации PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> были измерены с использованием растровой электронной микроскопии. Углублённое обследование проведено на 360 детях, анализировались общеклинические показатели цельной крови. Для статистического анализа использовались инструменты в программной среде Python, для прогнозирования морфометрических изменений эритроцитов использовалась двухслойная нейронная сеть. Также были применены модели Эванса и комплексной поверхности для моделирования формы эритроцитов. Средняя суточная концентрация PM<sub>10</sub> превышала показатель на территории наблюдения, но не достигала предельной допустимой концентрации (ПДК=0,060 мг/м<sup>3</sup>). Содержание PM<sub>2,5</sub> было значительно выше на территории сравнения и превышало среднюю суточную ПДК, равную 0,035 мг/м<sup>3</sup>. Результаты исследования показали достоверные различия ( $p=0,0001$ ) между группами наблюдения и сравнения в показателях цельной крови, особенно в цветном показателе и среднем объёме эритроцита. Корреляционный анализ установил связь между различными показателями крови, концентрацией гемоглобина и уровнем концентрации частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в воздухе. На основе моделирования с использованием нейронной сети была построена математическая модель, предсказывающая влияние различных факторов на средний объём эритроцитов. Модель показала, что повышенная концентрация PM<sub>2,5</sub> связана со снижением среднего объёма эритроцитов, что может указывать на их преждевременное старение. В целом, данное исследование приводит к новым научным выводам о взаимосвязи между загрязнением воздуха и морфометрическими параметрами эритроцитов у детей. Это может способствовать разработке более эффективных стратегий по охране здоровья и снижению негативного воздействия загрязнения воздуха на население.

**Ключевые слова:** качество воздуха, загрязнение воздуха, эритроциты, старение эритроцитов, объём эритроцитов, морфология, нейронная сеть.

## Indicators of chronic exposure to elevated concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> on the parameters of children's red blood cells

© 2024. N. V. Zaitseva ORCID: 0000-0003-2356-1145, M. A. Zemlianova ORCID: 0000-0002-8013-9613,  
A. M. Ignatova ORCID: 0000-0001-9075-3257, Yu. V. Koldibekova ORCID: 0000-0002-3924-4526,  
M. S. Stepankov ORCID: 0000-0002-7226-7682, E. V. Peskova ORCID: 0000-0002-8050-3059,  
Federal Scientific Center for Medical and Preventive  
Health Risk Management Technologies,  
82, Monastyrskaya St., Perm, Russia, 614045,  
e-mail: iamptstu@yandex.ru

The study was conducted to identify the effects of elevated concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> particles in the air on the morphometric parameters of erythrocytes in children. Two areas with similar geoclimatic conditions but different exposure to these particles were selected. The concentrations of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> were measured using scanning electron microscopy. In-depth investigations were conducted on 360 children, and general clinical indicators of whole blood were analyzed. Statistical analysis tools in the Python programming environment were used for data analysis, and a two-layer neural network was employed to predict morphometric changes in erythrocytes. Evans models and a complex surface

model were also applied to simulate erythrocyte shape. The average daily concentration of PM10 exceeded the observed level but did not reach the permissible limit (MPC=0.060 mg/m<sup>3</sup>). The content of PM2.5 was significantly higher in the comparison area and exceeded the average daily permissible concentration (MPC=0.035 mg/m<sup>3</sup>). The research results revealed significant differences ( $p=0,0001$ ) between the observation and comparison groups in the indicators of whole blood, especially in color index and mean erythrocyte volume. Correlation analysis established a connection between various blood parameters, hemoglobin concentration, and the level of PM2.5 and PM10 particle concentrations in the air. Based on neural network modeling, a mathematical model was developed to predict the influence of various factors on the mean erythrocyte volume. The model showed that increased PM2.5 concentration is associated with a decrease in mean erythrocyte volume, which may indicate premature aging. Overall, this study contributes to new scientific findings on the relationship between air pollution and morphometric parameters of erythrocytes in children. It can aid in the development of more effective health protection strategies and the reduction of the negative impact of air pollution on the population.

**Keywords:** air quality, air pollution, erythrocytes, erythrocyte aging, erythrocyte volume, morphology, neural network.

Общепринятыми показателями загрязнения атмосферного воздуха, в числе других, являются показатели содержания взвешенных частиц PM2,5 и PM10, которые характеризуют концентрацию твёрдых частиц диаметром 2,5 мкм и менее и 10 мкм и менее соответственно [1]. Твёрдые частицы указанного размера в воздухе имеют как природное, так и техногенное происхождение. Известно, что концентрации PM2,5 и PM10 в воздухе возрастают в период лесных пожаров [2] и стабильно являются повышенными в непосредственной близости от автотранспортных магистралей в результате выбросов газов при сгорании дизельного топлива [3, 4]. Кроме того, известно, что в атмосферном воздухе могут присутствовать специфические твёрдые частицы, характерные для определённых природных территорий, например, для морских прибрежных районов [5]. Техногенное происхождение частиц определяется тем, что они входят в состав компонентов выбросов предприятий большинства отраслей промышленного производства [6]. Форма, состав и другие физические параметры частиц разнообразны [7] и зависят от их происхождения.

О негативном влиянии частиц PM2,5 и PM10 на здоровье человека при аэрогенной экспозиции известно из многочисленных исследований. Так в работах [8, 9] приведены данные комплексных исследований о влиянии повышенной концентрации ультрасперсных частиц на состояние дыхательной системы и на уровень биомаркеров воспаления в плазме крови человека. Доказанным является тот факт, что повышенное содержание частиц PM2,5 в воздухе ассоциировано с риском смертности от сердечно-сосудистых заболеваний, таких как инфаркт миокарда и аритмия [10]. В некоторых исследованиях рассматривается влияние хронической аэрогенной экспозиции взвешенными частицами PM2,5 при их повышенной концентрации на

общеклинические показатели крови и кровяное давление [11].

Некоторые сведения о механизме негативного воздействия частиц PM2,5 и PM10 представлены в работе [12]. Авторами выявлены морфологические изменения эритроцитов крови мышей, подвергнутых экспозиции воздухом с высоким содержанием PM2,5. Отмечается, что морфометрические изменения эритроцитов выражались в виде снижения глубины вогнутости и объёма эритроцита. Указанные морфологические изменения соответствуют естественным изменениям данных клеток, характерным для процесса их старения. Исследования одиночных эритроцитов (single-cell analysis) [13] указывают на то, что старение эритроцитов сопровождается несколькими характерными признаками: увеличением плотности и снижением объёма клеток, повышением концентрации ионов кальция, снижением способности сопротивления гемолизу, снижением ферментативной активности и изменением эллиптической формы на более сферическую.

В совокупности приведённые данные позволяют предположить, что хроническая экспозиция человека при ненормативном качестве атмосферного воздуха по содержанию взвешенных частиц PM2,5 может привести к преждевременному старению эритроцитов крови и снижению их функциональной активности. Длительное воздействие может привести к развитию системных патологий у подверженного экспозиции населения, в первую очередь, у детского, что обусловлено их повышенной чувствительностью к химической нагрузке в силу несовершенства анатомо-физиологического развития организма [14].

Целью исследования является выявление признаков хронического воздействия повышенных концентраций частиц PM2,5 и PM10 в атмосферном воздухе на морфометрические параметры эритроцитов у детей.

**Объекты и методы исследования**

По данным ежегодных мониторинговых наблюдений качества атмосферного воздуха по содержанию взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> за период с 2012 по 2022 гг. выделены две территории, расположенные в одинаковых геоклиматических условиях, но различающиеся по уровню экспозиции населения, обусловленной выбросами в атмосферу от источников крупного хозяйствующего объекта металлургического профиля (территория наблюдения и территория сравнения).

Для исследования параметров твёрдых частиц в атмосферном воздухе данных территорий выполнен отбор среднесуточных проб воздуха на фильтры АФА-ВП-20 (материал волокон фильтра – перхлорвиниловые волокна) с помощью прибора ПА-300М-2 (Россия). Концентрации PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> установлены на основе данных, полученных при анализе изображений частиц, задержанных фильтрами. Изображения частиц получали методом растровой электронной микроскопии (микроскоп JSM-63090LV, JEOL Ltd., Япония). Для проведения съёмки из центральной и периферийной областей тела фильтра были вырезаны участки размером 1 см<sup>2</sup>, на поверхность которых было нанесено углеродное покрытие для повышения качества съёмки. Анализ изображений для получения количественных характеристик проведён в программе ImageJ-Fiji (модуль «Analyze Particles»).

Статистические показатели параметров частиц определяли в программной среде Python. Использованы библиотека NumPy для работы с массивами данных и выполнения математических операций с ними; библиотека Pandas – для работы с табличными данными и выполнения различных операций с ними, таких как сортировка, фильтрация и группировка; библиотека Matplotlib – для создания графиков, диаграмм и визуализации данных в языке программирования Python.

Расчёт концентраций взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> выполнен в соответствии с методическими указаниями МУК 4.1.3242-14 «Измерение массовой концентрации мелкодисперсных частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в атмосферном воздухе с использованием метода лазерной дифракции».

Оценка влияния аэрогенной экспозиции взвешенными частицами PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> на эритроциты крови детей выполнена по результатам углублённого обследования 360 детей в возрасте 3–7 лет. Выборка детей, проживаю-

щих не менее 3-х лет в зоне экспозиции частицами PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> включала 266 человек, в том числе 120 мальчиков и 146 девочек (группа наблюдения). Выборка детей, проживающих на территории с отсутствием экспозиции изучаемыми частицами (средняя суточная концентрация не превышала ПДК – 0,060 мг/м<sup>3</sup> для PM<sub>10</sub> и 0,035 мг/м<sup>3</sup> для PM<sub>2,5</sub> [1]) включала 94 ребенка, в том числе 52 мальчика и 42 девочки аналогичного возраста (группа сравнения). Выборки по половому и возрастному составу, социально-бытовым условиям проживания, среднему уровню материального обеспечения, по частоте и характеру вредных привычек у родителей, по психологическому климату в семье были сопоставимы.

Углублённое обследование детей, включённых в выборки, выполнено в соответствии с обязательным соблюдением этических норм, изложенных в Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации 1964 г. (в действующей редакции), в Национальном стандарте Российской Федерации ГОСТ-Р 52379-2005 «Надлежащая клиническая практика» (ICH E6 GCP). От каждого законного представителя ребёнка, включённого в выборку, получено письменное информированное согласие на добровольное участие в обследовании.

В работе рассматриваются общеклинические показатели цельной крови, а именно, – концентрация гемоглобина (HGB), количество эритроцитов (RBC), цветной показатель (CI), анизоцитоз (RDWc) и средний объём одного эритроцита (MCV). Данные показатели были выбраны как наиболее информативные с точки зрения изменений эритроцитов, что отражено в работах [15, 16]. Отбор цельной крови выполнен из локтевой вены (венозной) утром (натощак) в вакутейнер для последующего выполнения анализа крови импедансометрическим и фотометрическим методом с использованием автоматического гематологического анализатора «Drew-3».

Статистический анализ общеклинических показателей определяли в программной среде Python (модуль Seaborn (Python) для визуализации и анализа данных, а также Pandas и Matplotlib). Выявление связи между показателями крови и уровнем концентрации частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в атмосферном воздухе выполнено по методу определения коэффициентов корреляции Пирсона. Достоверность оценивали для  $p \leq 0,05$ .

При выявлении достоверных коэффициентов корреляции отбирали наиболее значи-

мые из них для прогнозирования морфометрических изменений эритроцитов с помощью двухслойной нейронной сети: первый слой с 32 нейронами и функцией активации ReLU и второй слой из одного нейрона без активации. Входной слой имел размерность, соответствующую количеству признаков, определяющих морфометрический показатель. Для обучения модели использовали оптимизатор Adam и функцию потерь на основе определения среднеквадратичной ошибки. Модель проходила 10 эпох обучения с размером пакета 32.

Моделирование морфометрических изменений эритроцитов, соответствующих прогнозам, выполнено двумя методами.

Для построения общего контура использована модель Эванса [17, 18], которая описывает форму эритроцита с использованием комбинации косинусов. Математически модель Эванса имеет следующий вид:

$$R(\theta) = a + b \cdot c \cdot \cos(2\theta) + d \cdot \cos(3\theta) \quad (1)$$

где  $R(\theta)$  – радиус эритроцита в зависимости от угла  $\theta$ ,  $\theta$  – угол, который изменяется от 0 до  $2\pi$  и определяет точки на контуре эритроцита (угол поворота контура),  $a$  – базовый радиус эритроцита, определяющий средний размер,  $b$  – амплитуда первой гармоники, влияющей на форму контура,  $c$  – амплитуда второй гармоники, влияющей на форму контура,  $d$  – амплитуда третьей гармоники, влияющей на форму контура.

Для построения уточнённого контура, а также определения объёма и площади поверхности эритроцита использована модель комплексной поверхности, на основе модели двояковогнутого диска, с моделированием неровностей на поверхности клетки [19]:

$$S = D \cdot \sqrt{1 - \frac{4r^2}{D^2} \left( a_0 + \frac{a_1 r^2}{D^2} + \frac{a_2 r^4}{D^4} \right) + \left( b_0 + \frac{b_1 r^2}{D^2} + \frac{b_2 r^4}{D^4} \right) \cdot \cos \frac{4\pi r}{D} + 0,1 \frac{\sin(10\pi r)}{D} + 0,001 \frac{\sin(20\pi r)}{D} + 0,00001 \frac{\cos(30\pi r)}{D} + 0,000001 \frac{\cos(40\pi r)}{D} \quad (2),$$

где  $r$  – радиус,  $D$  – диаметр,  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2$  – уточняющие коэффициенты.

## Результаты и обсуждение

Результаты оценки качества воздуха по уровню содержания PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в воздухе исследуемых территорий представлены в таблице 1.

Анализ полученных результатов позволил установить, что средняя суточная концентрация взвешенных частиц PM<sub>10</sub> в атмосферном воздухе территории наблюдения в 1,6 раза выше данного показателя территории сравнения, но не превышает предельную допустимую концентрацию (ПДК). Содержание частиц PM<sub>2,5</sub> в атмосферном воздухе территории наблюдения в 10,2 раза выше показателя территории сравнения и в 1,2 раза выше средней суточной ПДК (ПДК<sub>с.с.</sub>).

Результаты исследования показателей цельной крови детей группы наблюдения и сравнения представлены в таблице 2.

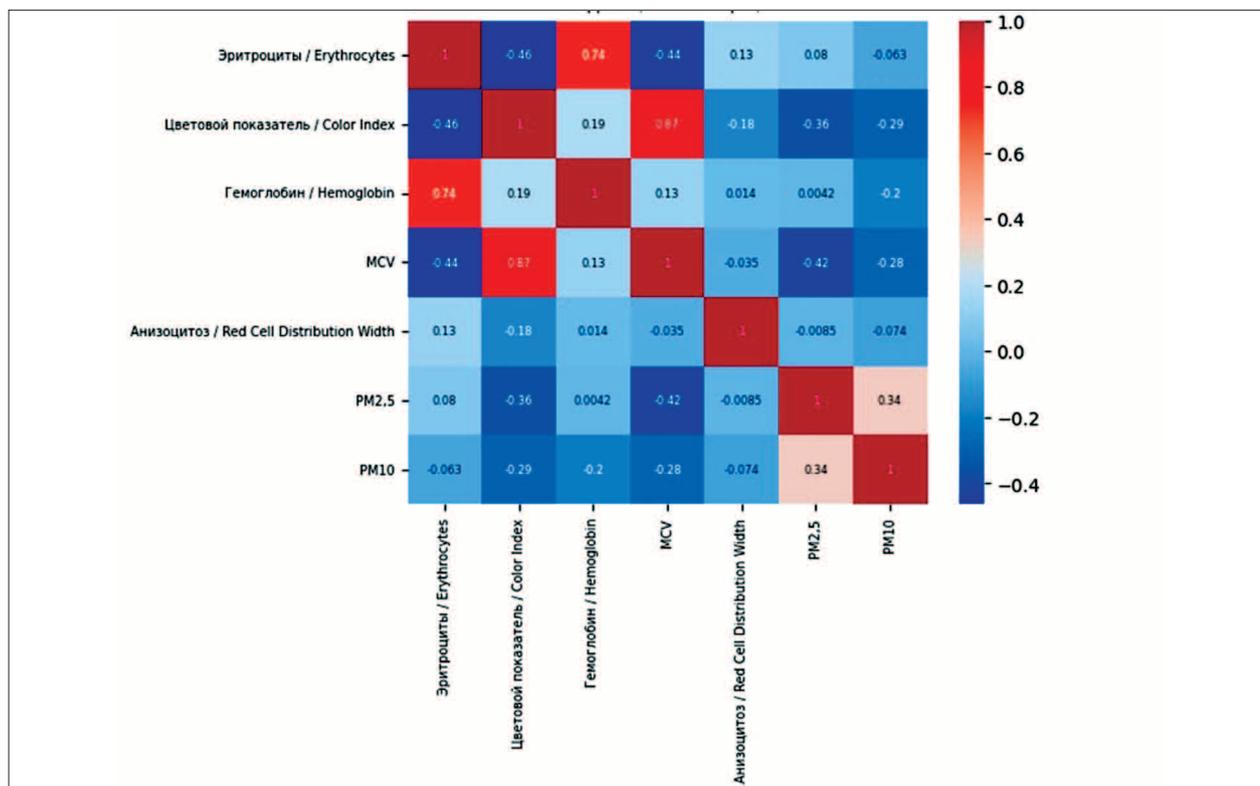
Достоверные межгрупповые различия обнаружены для цветного показателя ( $p=0,0001$ ) и среднего объёма эритроцита ( $p=0,0001$ ). Корреляционная матрица, полученная при обработке массива данных общеклинических анализов, представлена на рисунке 1 (см. цв. вкладку V).

Согласно полученной корреляционной матрице (рис. 1), количество эритроцитов в единице объёма крови и концентрация гемоглобина имеют устойчивую положительную корреляцию ( $r=0,74$ ), при этом количество эритроцитов и цветной показатель имеют отрицательную корреляцию ( $r=-0,46$ ), что указывает на обратную связь между ними. Цветной показатель, в свою очередь, имеет сильную положительную корреляционную связь ( $r=0,87$ ) с величиной среднего объёма эритроцита (MCV). Величина MCV имеет слабую положительную корреляцию с концентрацией гемоглобина крови ( $r=0,13$ ).

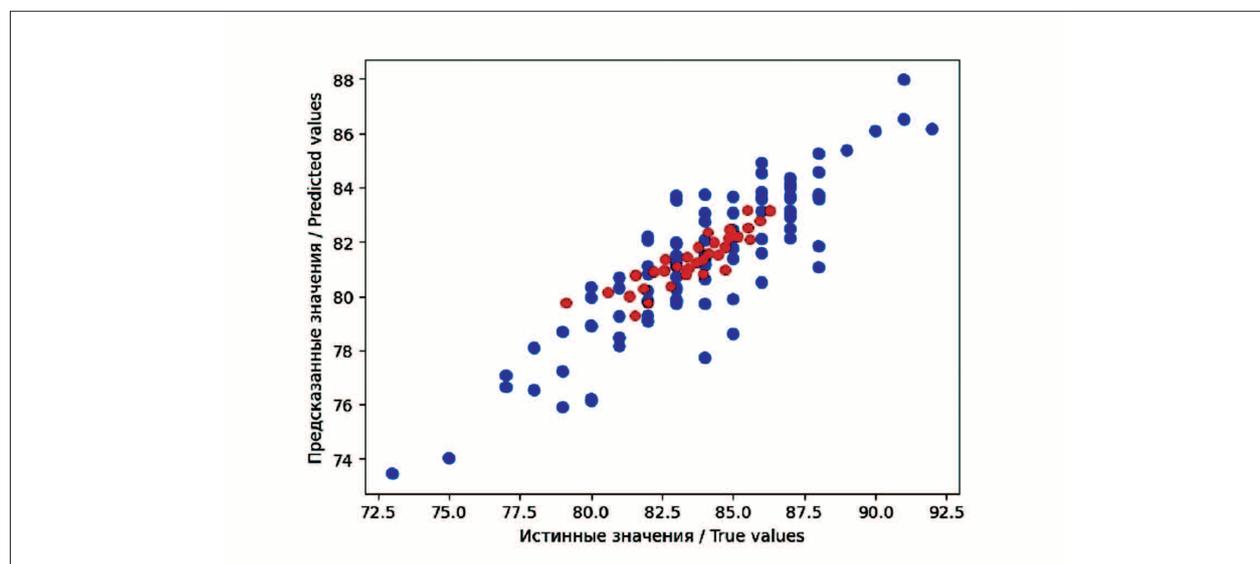
Уровень концентрации в атмосферном воздухе частиц PM<sub>2,5</sub> имеет отрицательную корреляцию с цветным показателем ( $r=-0,36$ ) и величиной MCV ( $r=-0,42$ ), что косвенно связывает этот показатель с концентрацией гемоглобина и количеством эритроцитов. Уровень концентрации в воздухе PM<sub>10</sub> имеет слабую отрицательную корреляцию с цветным показателем ( $r=-0,29$ ) и величиной MCV ( $r=-0,28$ ). Показатель анизоцитоза не проявил признаков линейной корреляции.

Поскольку показатель «средний объём эритроцита» имеет наибольшее количество взаимосвязей с остальными общеклиническими показателями, его выбрали для прогнозирования в качестве цели обучения нейронной сети. В процессе обучения нейронной сети были отображены значения функции потерь (loss) для каждой эпохи. В каждой эпохе функция потерь уменьшалась, что говорит о том, что модель улучшалась.

**Н. В. Зайцева, М. А. Землянова, А. М. Игнатова,  
Ю. В. Кольдибекова, М. С. Степанков, Е. В. Пескова,  
«Признаки хронического воздействия повышенных концентраций  
PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> на параметры эритроцитов у детей». С. 184.**



**Рис. 1.** Корреляционная матрица уровня общеклинических показателей крови и концентрации взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub> в атмосферном воздухе  
**Fig. 1.** Correlation matrix of general clinical blood indicators and concentrations of PM<sub>2,5</sub> and PM<sub>10</sub> particulate matter in ambient air



**Рис. 2.** Сопоставление истинных значений (красные точки) среднего объема эритроцита и прогнозных (синие точки), сгенерированных с помощью нейросети  
**Fig. 2.** Comparison of true values (red dots) of mean erythrocyte volume and predicted (blue dots) values generated by the neural network

Таблица 1 / Table 1

Содержание взвешенных частиц PM2,5 и PM10 в атмосферном воздухе обследованных территорий  
The content of suspended particles PM2.5 and PM10 in the atmospheric air of the surveyed territories

Взвешенные частицы Particulate matter	ПДК <sub>с.с.</sub> , мг/м <sup>3</sup> Maximum permissible concentration (average daily), mg/m <sup>3</sup> [1]	Среднесуточная концентрация, мг/м <sup>3</sup> Average daily concentration, mg/m <sup>3</sup>	
		территория наблюдения observation area	территория сравнения comparison area
PM2,5	0,035	0,041	0,004
PM10	0,06	0,018	0,011

Таблица 2 / Table 2

Общеклинические показатели крови детей, проживающих на территориях с разным уровнем концентраций частиц PM2,5 и PM10 в атмосферном воздухе  
General clinical blood indicators of children residing in areas with different levels of PM2.5 and PM10 particle concentrations in ambient air

Показатель Indicator	Среднее значение (M±m) Mean value (M±m)		Межгрупповые различия по средним показателям (p≤0,05) Inter-group differences in mean indicators (p≤0.05)
	группа наблюдения observation group	группа сравнения comparison group	
Средний объём эритроцита (MCV), мкм <sup>3</sup> Mean corpuscular volume (MCV), μm <sup>3</sup>	82,55±0,82	85,36±0,93	0,0001*
Анизоцитоз эритроцитов (RDWc), % Red Cell Distribution width (RDWc), %	13,19±0,19	13,19±0,24	0,958
Гемоглобин (HGB), г/дм <sup>3</sup> Hemoglobin (HGB), g/L	134,18±1,88	134,13±2,15	0,973
Цветной показатель, пг Color index, pg	28,51±0,33	29,40±0,32	0,0001*
Эритроциты (RBC), 10 <sup>12</sup> /дм <sup>3</sup> Erythrocytes (RBC), 10 <sup>12</sup> /L	4,60±0,078	4,56±0,08	0,436

Примечание: звёздочкой показаны показатели достоверных межгрупповых различий.  
Note: the asterisk represents the indicators of significant intergroup differences.

свою производительность. Значение функции потерь (показателя, который позволяет оценить качество модели машинного обучения) на последней эпохе составило 15,34 мкм<sup>3</sup>, а результат корреляции составил 0,94, что в совокупности указывает на высокую положительную связь между предсказанными и истинными значениями.

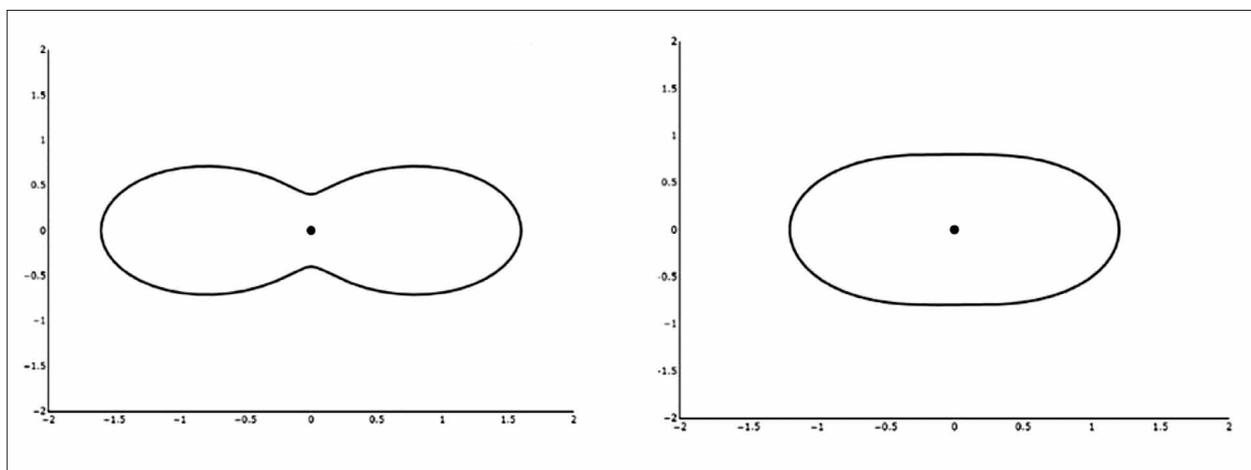
Для визуализации результатов обучения построен график (рис. 2, см. цв. вкладку V), на котором истинные значения отображены по оси x, а прогнозные значения – по оси y. Прогнозные значения использовали для формулирования математической модели средствами регрессионного анализа по методу наименьших квадратов в среде Python. Предварительная проверка показала, что концентрация частиц PM10, как предиктор, не оказывает статистически значимого влияния на величину MCV. В результате предложена формула (3) для прогнозирования изменения объёма эритроцита:

$$MCV = 54,9247 + 1,0958 \cdot CI + 0,2447 \cdot HGB - 7,4876 \cdot RBC - 38,7766 \cdot PM2,5 \quad (3)$$

где MCV – средний объём эритроцита, мкм<sup>3</sup>, CI – цветной показатель, пг, HGB – концентрация гемоглобина, г/дм<sup>3</sup>, RBC – количество эритроцитов, ·10<sup>12</sup>/дм<sup>3</sup>, PM2,5 – концентрация в воздухе частиц диаметром менее 2,5 мкм, мг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент детерминации R<sup>2</sup> равен 0,79, что означает, что модель объясняет 78,8% изменчивости дисперсии переменной «MCV». Статистические показатели модели, а именно F-критерий (69,91) и соответствующей ему p=3,81·10<sup>-30</sup> указывают на общую статистическую значимость модели.

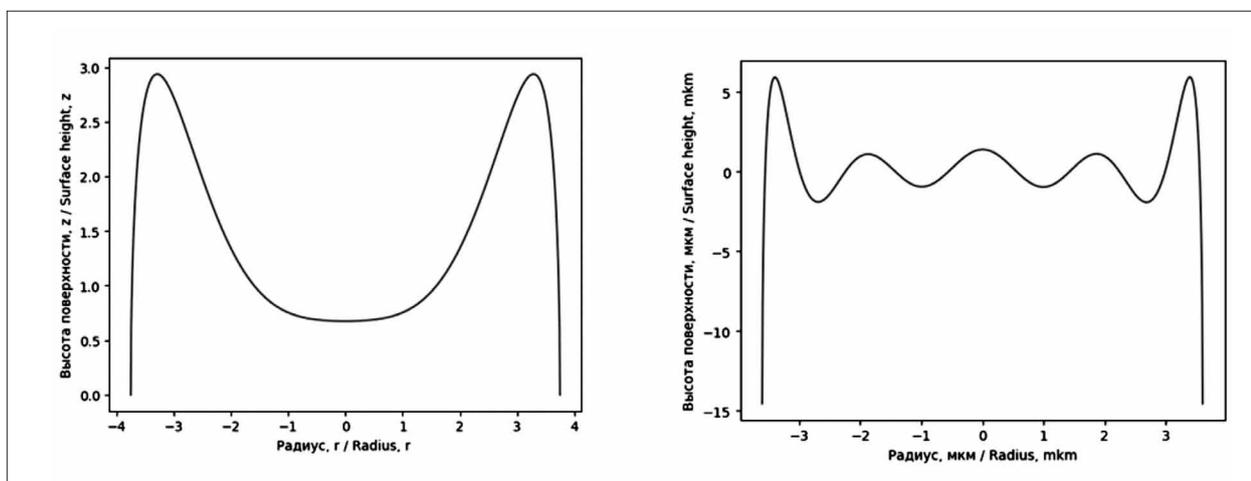
Предложенная модель демонстрирует, что воздействие частиц PM2,5 приводит к снижению показателя среднего объёма эритроцита, следствием чего может являться преждевременное старение эритроцитов. Од-



a

b

**Рис. 3.** Модель контура эритроцитов: а – физиологическая норма, б – изменённая форма под воздействием повышенной концентрации частиц PM2,5 в атмосферном воздухе  
**Fig. 3.** Erythrocyte contour model: a – physiological norm, b – altered shape under the influence of elevated concentrations of PM2.5 particles in ambient air



a

b

**Рис. 4.** Уточнённый контур эритроцитов: а – физиологическая норма, б – изменённая форма под воздействием повышенной концентрации частиц PM2,5 в атмосферном воздухе  
**Fig. 4.** Refined erythrocyte contour: a – physiological norm, b – altered shape under the influence of elevated concentrations of PM2.5 particles in ambient air

нако, следует учесть, что изменение среднего показателя объёма клеток, в данном случае, не подразумевает равномерного изменения всех эритроцитов в крови одновременно. Из работы [14] известно, что существует функциональная неравнозначность эритроцитов, и они не все способны одинаково реагировать на агрессивное воздействие или нагрузку со стороны внешней среды. Некоторые «принимают удар на себя», в результате чего признаки преждевременного старения предположительно проявляются только у определённой доли эритроцитов.

В результате исследований предположено, что доля эритроцитов с признаками прежде-

временного старения коррелирует с параметрами воздействия частиц PM2,5, например, с длительностью воздействия и их концентрацией в воздухе, однако, подтверждение этого требует дальнейших исследований. Тем не менее, использование модели Эванса позволяет смоделировать контур тех эритроцитов крови человека, которые подверглись преждевременному старению под воздействием частиц PM2,5 на уровне 0,041 мг/м<sup>3</sup> (рис. 3b) и сопоставить его с физиологической нормой (рис. 3a). Уточнённый контур представлен на рисунке 4.

На рисунке 4a представлена поверхность неизменённого эритроцита, которая соот-

ветствует простому двояковогнутому диску и объёму  $8,5 \cdot 10^{-14}$  дм<sup>3</sup> с площадью поверхности 145 мкм<sup>2</sup>, а на рисунке 4b поверхность соответствует двояковогнутому диску с объёмом  $8,2 \cdot 10^{-14}$  дм<sup>3</sup> и площадью поверхности 115 мкм<sup>2</sup>.

### Заключение

Таким образом, выявлено, что общеклиническим признаком хронического воздействия повышенных концентраций частиц PM<sub>2,5</sub> в атмосферном воздухе на морфометрические параметры эритроцитов у детей является изменение величины среднего объёма эритроцита. При этом концентрация в воздухе PM<sub>10</sub> не оказывает влияния на данный показатель, так же, как и на концентрацию гемоглобина, количество эритроцитов, цветной показатель и анизоцитоз. Изменение среднего объёма эритроцита, по всей видимости, связано с преждевременным старением отдельных эритроцитов. Неодинаковая стойкость эритроцитов к действию негативных факторов внешней среды указывает на особенности обменных реакций, поэтому полученные результаты имеют ценность в дальнейшем изучении изменений метаболизма человека, а также в выявлении вариантов индивидуальной адаптации к воздействию окружающей среды.

### Литература

1. ГОСТ Р 70230-2022. Качество воздуха. Методика определения массовой концентрации взвешенных частиц PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> в воздухе рабочей зоны на основе анализа фракционного состава пыли. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 12 с.
2. Медвяцкая А.М., Рапута В.Ф., Ярославцева Т.В. Загрязнение атмосферы г. Новосибирска субмикронными аэрозолями в период лесных пожаров 2019 года // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2020. № 1 (4). С. 98–104.
3. Васильев А.Н., Гараев А.Л., Кагриев Р.С., Козловцева Е.Ю. Исследование загрязнения мелкодисперсной пылью воздуха придорожных территорий // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 3 (63). С. 40–42.
4. Karjalainen P., Pirjola L., Heikkilä J., Lähde T., Tzankiozis T., Ntziachristos L., Keskinen J., Rönkkö T. Exhaust particles of modern gasoline vehicles: A laboratory and an onroad study // *Atmospheric Environment*. 2014. V. 97. No. 11. P. 262–270. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.025
5. Вареник А.В., Калинин Д.В., Мыслина М.А. Исследование взвешенных микрочастиц в атмосфере береговой зоны Чёрного моря по натурным и спутниковым данным // *Морской гидрофизический журнал*. 2021. № 3 (219). С. 350–361.

6. Игнатова А.М., Верещагин В.И. Применение метода анализа изображений в исследовании и статистической оценке параметров частиц твёрдой составляющей сварочных аэрозолей силикатного и оксидного состава // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2017. № 1 (19). С. 41–57.
7. Леденцова Е.Е., Зайцева Н.В., Землянова М.А. Оценка воздействия выбросов нефтеперерабатывающих производств на здоровье населения // *Гигиена и санитария*. 2004. № 1. С. 10–12.
8. Karotki D.G., Bekö G., Clausen G., Madsen A.M., Andersen Z.J., Massling A., Ketzel M., Ellermann T., Lund R., Sigsgaard T., Møller P., Loft S. Cardiovascular and lung function in relation to outdoor and indoor exposure to fine and ultrafine particulate matter in middle-aged subjects // *Environ Int*. 2014. V. 8. No. 73. P. 372–381. doi: 10.1016/j.envint.2014.08.019
9. Вильк М.Ф., Сачкова О.С., Леванчук Л.А., Латынин Е.О. Особенности оценки профессионального риска здоровью работников, контактирующих с аэрозолями мелкодисперсных пылевых частиц // *Анализ риска здоровью*. 2020. № 4. С. 106–112.
10. Rodríguez-Camargo L.A., Sierra-Parada R.J., Blanco-Becerra L.C. Spatial analysis of PM<sub>2.5</sub> concentrations in Bogotá according to the World Health Organization air quality guidelines for cardiopulmonary diseases, 2014-2015 // *Biomedica*. 2020. V. 40. No. 1. P. 137–152. doi: 10.7705/biomedica.4719
11. Soppa V.J., Schins R.P.F., Hennig F., Nieuwenhuijsen M.J., Hellack B., Quass U., Kaminski H., Sasse B., Shinnawi S., Kuhlbusch T.A.J., Hoffmann B. Arterial blood pressure responses to short-term exposure to fine and ultrafine particles from indoor sources – A randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers // *Environ Res*. 2017. V. 158. No. 10. P. 225–232. doi: 10.1016/j.envres.2017.06.006
12. Wardoyo A.Y.P., Juswono U.P., Noor J.A. How exposure to ultrafine and fine particles of car smoke can alter erythrocyte forms of male mice // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. V. 28. No. 4. P. 2901–2910. doi: 10.15244/pjoes/94047
13. Bogdanova A., Kaestner L., Simionato G., Wickrema A., Makhro A. Heterogeneity of red blood cells: causes and consequences // *Front Physiol*. 2020. V. 11. No. 5. P. 11–25. doi: 10.3389/fphys.2020.00392
14. Зайцева Н.В., Устинова О.Ю., Землянова М.А. Совершенствование стратегических подходов к профилактике заболеваний, ассоциированных с воздействием факторов среды обитания // *Здоровье населения и среда обитания*. 2013. № 11 (248). С. 14–18.
15. Клиорин А.И., Тиунов Л. А. Функциональная неравнозначность эритроцитов. АН СССР. Научный совет по комплексным проблемам физиологии человека и животных. Ленинград: Наука. Ленингр. отд-ние, 1974. 147 с.

16. Оборин В.А., Ашихмина Т.Я. Экспериментальное обоснование возможности применения эритроцитов в качестве модели при изучении мембраноповреждающего действия наночастиц // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 176–181. doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-176-181

17. Evans E., Fung Y.C. Improved measurements of the Erythrocyte geometry // *Microvasc. Res.* 1972. No. 4 (15). P. 335–347.

18. Кравчук Д.А. Применение оптоакустических методов в биомедицинских исследованиях // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2017. № 4 [Электронный ресурс] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4484> (Дата обращения: 08.09.2023).

19. Кучель Ф.У., Факерелл Э.Д. Представление двояковогнутых эритроцитов параметрическим уравнением // Бюллетень математической биологии. 1999. № 61 (2). С. 209–220.

## References

1. GOST R 70230-2022. Air quality. The method of determining the mass concentration of suspended particles PM2.5, PM10 in the air of the working area based on the analysis of the fractional composition of dust. Moskva: Rossiyskiy institut standartizatsii, 2021. 12 p. (in Russian).

2. Medvyatskaya A.M., Raputa V.F., Yaroslavtseva T.V. Pollution of the atmosphere of Novosibirsk by submicron aerosols during forest fires in 2019 // *Interexpo Geo-Siberia*. 2020. No. 1 (4). P. 98–104 (in Russian).

3. Vasiliev A.N., Garaev A.L., Kagriev R.S., Kozlovitseva E.Yu. Investigation of air pollution by fine dust of roadside territories // *Engineering Bulletin of the Don*. 2020. No. 3 (63). P. 40–42 (in Russian).

4. Karjalainen P., Pirjola L., Heikkilä J., Lähde T., Tzankiozis T., Ntziachristos L., Keskinen J., Rönkkö T. Exhaust particles of modern gasoline vehicles: A laboratory and an onroad study // *Atmospheric Environment*. 2014. V. 97. No. 11. P. 262–270. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.08.025

5. Varenik A.V., Kalinskaya D.V., Myslina M.A. Investigation of suspended microparticles in the atmosphere of the coastal zone of the Black Sea based on natural and satellite data // *Marine Hydrophysical Journal*. 2021. No. 3 (219). P. 350–361 (in Russian).

6. Ignatova A.M., Vereshchagin V.I. Application of the image analysis method in the study and statistical evaluation of particle parameters of the solid component of welding aerosols of silicate and oxide composition // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science*. 2017. No. 1 (19). P. 41–57 (in Russian).

7. Ledentsova E.E., Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A. Assessment of the impact of emissions from oil refining industries on public health // *Hygiene and sanitation*. 2004. No. 1. P. 10–12 (in Russian).

8. Karotki D.G., Bek G., Clausen G., Madsen A.M., Andersen Z.J., Massling A., Ketzler M., Ellermann T., Lund R.,

Sigsgaard T., Møller P., Loft S. Cardiovascular and lung function in relation to outdoor and indoor exposure to fine and ultrafine particulate matter in middle-aged subjects // *Environ Int.* 2014. V. 8. No. 73. P. 372–381. doi: 10.1016/j.envint.2014.08.019

9. Vilk M.F., Sachkova O.S., Levanchuk L.A., Latynin E.O. Features of occupational health risk assessment of workers in contact with aerosols of fine dust particles // *Health risk analysis*. 2020. No. 4. P. 106–112 (in Russian).

10. Rodriguez-Camargo L.A., Sierra-Parada R.J., Blanco-Becerra L.C. Spatial analysis of PM2.5 concentrations in Bogotá according to the World Health Organization air quality guidelines for cardiopulmonary diseases, 2014–2015 // *Biomedica*. 2020. V. 40. No. 1. P. 137–152. doi: 10.7705/biomedica.4719

11. Soppa V.J., Schins R.P.F., Hennig F., Nieuwenhuijsen M.J., Hellack B., Quass U., Kaminski H., Sasse B., Shinnawi S., Kuhlbusch T.A.J., Hoffmann B. Arterial blood pressure responses to short-term exposure to fine and ultrafine particles from indoor sources – A randomized sham-controlled exposure study of healthy volunteers // *Environ Res.* 2017. V. 158. No. 10. P. 225–232. doi: 10.1016/j.envres.2017.06.006

12. Wardoyo A.Y.P., Juswono U.P., Noor J.A. How exposure to ultrafine and fine particles of car smoke can alter erythrocyte forms of male mice // *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. V. 28. No. 4. P. 2901–2910. doi: 10.15244/pjoes/94047

13. Bogdanova A., Kaestner L., Simionato G., Wickrema A., Makhro A. Heterogeneity of red blood cells: Causes and consequences // *Front Physiol*. 2020. V. 11. No. 5. P. 11–25. doi: 10.3389/fphys.2020.00392

14. Zaitseva N.V., Ustinova O.Yu., Zemlyanova M.A. Improving strategic approaches to prevention of diseases associated with the impact of environmental factors // *Population health and habitat*. 2013. No. 11 (248). P. 14–18 (in Russian).

15. Kliorin A.I., Tiunov L.A. Functional inequality of erythrocytes. USSR Academy OF Sciences. Sci. council on complex problems of human and animal physiology. Leningrad: Nauka. Leningr. otделение, 1974. 147 p. (in Russian).

16. Oborin V. A., Ashikhmina T. Ya. Experimental substantiation of the possibility of using erythrocytes as a model in the study of the membrane-damaging effect of nanoparticles // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 176–181 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-176-181

17. Evans E., Fung Y.C. Improved measurements of the Erythrocyte geometry // *Microvasc. Res.* 1972. No. 4 (15). P. 335–347 (in Russian).

18. Kravchuk D.A. Application of optoacoustic methods in biomedical research // *Electronic scientific journal “Engineering Bulletin of the Don”*. 2017. No. 4 [Internet resource] <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4484> (Accessed: 08.09.2023) (in Russian).

19. Kuchel F.U., Fakerell E.D. Representation of bi-concave erythrocytes by a parametric equation // *Bulletin of Mathematical Biology*. 1999. No. 61 (2). P. 209–220 (in Russian).

## Анализ закономерностей поглощения углерода горно-лесными, горно-степными и степными ландшафтами России на основе спутниковых данных и метеорологических наблюдений

© 2024. К. В. Мячина<sup>1,2</sup>, д. г. н., в. н. с., Р. В. Ряхов<sup>2</sup>, н. с.,  
 А. Н. Щавелев<sup>2</sup>, м. н. с., Р. М. Безбородникова<sup>2</sup>, к. э. н., м. н. с.,  
 С. А. Дубровская<sup>1,2</sup>, к. г. н., с. н. с.,  
<sup>1</sup>ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова,  
 364905, Россия, г. Грозный, пр. Х. А. Исаева, д. 100,  
<sup>2</sup>Институт степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН,  
 460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11,  
 e-mail: mavicsen@gmail.com

Цель исследования – оценить возможности и закономерности поглощения углерода наземной растительностью горно-лесных, горно-степных и степных ландшафтов России. Исследования выполнялись на семи ключевых участках в Республике Чечня и Оренбургской области. На первом этапе рассчитывались показатели поглощения чистого углерода растительностью (чистая первичная продуктивность в пересчёте на углерод) за 2000–2020 гг. на основе продуктов MOD17A3, позволяющих оценить валовую первичную продуктивность и чистую первичную продуктивность наземной фитомассы. На втором этапе на основе регрессионного моделирования выявлялись закономерности формирования способности к улавливанию чистого углерода растительным покровом каждого ключевого участка в зависимости от климато-метеорологических условий. Обнаружено, что предгорный участок с многолетним смешанным лесом и отсутствием антропогенной нагрузки демонстрирует максимальную способность к улавливанию углерода из атмосферы – от 2,6 до 3,5 кгС/м<sup>2</sup>/год. Участок естественной многолетней сухой степи характеризуется минимальной способностью к улавливанию углерода – от 0,5 до 1,5 кгС/м<sup>2</sup>/год. Созданы регрессионные модели зависимости показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик, демонстрирующие относительную стабильность способности многолетнего естественного растительного покрова поглощать углерод из атмосферы.

**Ключевые слова:** углерод, поглощение растительностью, спутниковые данные, климато-метеорологические характеристики, функциональная зависимость, регрессионная модель, горно-лесные и степные ландшафты России.

## Analysis of the carbon sequestration patterns by mountain-forest, mountain-steppe and steppe landscapes of Russia based on satellite data and meteorological observations

© 2024. K. V. Myachina<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0001-5190-1421, R. V. Ryakhov<sup>2</sup>, ORCID: 0000-0002-4762-3286,  
 A. N. Shchavalev<sup>2</sup>, ORCID: 0000-0002-7249-2193, R. M. Bezborodnikova<sup>2</sup>, ORCID: 0000-0002-7787-6188,  
 S. A. Dubrovskaya<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0002-1361-6942,  
<sup>1</sup>Grozny State Oil Technical University,  
 100, H. A. Isaeva pr., Grozny, Russia, 364051,  
<sup>2</sup>Institute of Steppe Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
 11, Pionerskaya St., Orenburg, Russia, 460000,  
 e-mail: mavicsen@gmail.com

The parameters of vegetation cover – a tool for capturing carbon from the atmosphere – vary widely depending on the latitudinal-zonal conditions of the area and local microclimate features. In this regard, the most promising approach to assessing the carbon balance of the territory is the analysis of net primary productivity and, accordingly, the possibilities of capturing carbon from the atmosphere by landscapes of various natural zones, differing in the types of vegetation cover, soil, microclimate and other landscape-ecological characteristics. The aim of the study is to assess the possibilities and patterns of carbon sequestration by vegetation of mountain-forest, mountain-steppe and steppe landscapes of Russia. The research was carried out at seven study plots in the Chechnya Republic and the Orenburg region. At the first stage, the indicators of net carbon sequestration by vegetation for 2000–2020 were calculated on the basis of MOD17A3 prod-

ucts that allow estimating gross primary productivity and net primary productivity. At the second stage, the regularities of the formation of the ability to capture carbon by the vegetation cover of each study plot, depending on climatic and meteorological conditions, on the basis of regression modeling were revealed. It was found that the foothill plot with a multi-year mixed forest and the absence of anthropogenic impact demonstrates the maximum ability to capture carbon from the atmosphere – from 2.6 to 3.5 kg/m<sup>2</sup>/year. The plot of a natural perennial dry steppe is characterized by a minimum carbon capture capacity – from 0.5 to 1.5 kgF/m<sup>2</sup>/year. Regression models of the dependence of the sequestration carbon indicators on climatic and meteorological characteristics have been created. These models demonstrate the relative stability of the ability of long-term natural vegetation cover to absorb carbon from the atmosphere.

**Keywords:** carbon sequestration by vegetation, climatic and meteorological characteristics, functional dependence, regression model, satellite data, mountain-forest and steppe landscapes of Russia.

В последние десятилетия в странах и регионах мира наблюдается увеличение выбросов парниковых газов в атмосферу как закономерная плата за стремительный экономический рост. Соответственно, на первый план выходят проблемы и стратегии стабилизации содержания основных парниковых газов в экосистеме для снижения рисков глобальных климатических изменений [1–5]. Первыми в ряду парниковых газов, усиливающих эффект температурных трансформаций в окружающей среде, стоят диоксид углерода CO<sub>2</sub> и метан CH<sub>4</sub>. Выделяют три основных подхода к снижению выбросов и концентрации CO<sub>2</sub> в атмосфере: 1) сокращение глобального энергопотребления, 2) разработка топлива с низким или нулевым содержанием углерода, 3) целенаправленная секвестрация CO<sub>2</sub> из точечных источников или атмосферы естественными и инженерными методами [6]. На данный момент именно естественные методы – поглощение наземной фитомассой экосистем – играют ключевую роль в улавливании углерода. По некоторым оценкам, растительный покров поглощает 44,4–66,3 Пг CO<sub>2</sub> / год [7, 8]. По мнению специалистов Всемирного центра мониторинга и охраны природы Программы ООН по окружающей среде (UNEP-WCMC), поглощение диоксида углерода наземной фитомассой, возможно, является единственным устойчивым способом регулирования и сокращения атмосферного CO<sub>2</sub>; при этом до 89% углерода, поглощаемого растениями, переходит в состав почвы [9]. Информация о параметрах фитомассы позволяет оценить запасы углерода, а мониторинг изменения её состояния на территориях различного географического масштаба напрямую связан с мониторингом изменений углеродного баланса. Признанными инструментами для получения информации о состоянии растительного покрова – наземной фитомассы являются спектральные индексы, рассчитываемые по данным дистанционного зондирования Земли [10, 11]. При помощи спутниковых спектрометров обеспечи-

ваются последовательные и систематические наблюдения за растительностью, позволяющие, в том числе, выполнить оценку двух показателей: 1) валовой первичной продуктивности (Gross Primary Productivity, GPP) – начальной общей продукции, созданной в результате фотосинтеза, 2) чистой первичной продуктивности (Net Primary Productivity, NPP) – чистого органического вещества, созданного в единицу времени и на единицу площади, за вычетом автотрофного дыхания растений [12–15]. Оценка NPP с помощью спутниковых данных базируется на том, что NPP напрямую связана с поглощённой солнечной энергией, которая, в свою очередь, коррелирует с растительными спектральными индексами [16–18]. Зная величину NPP и долю содержания углерода в сухом веществе фитомассы, можно рассчитать объём чистого поглощённого углерода.

Основными факторами, влияющими на показатели GPP и, следовательно, NPP, являются климато-метеорологические характеристики территории. Параметры растительного покрова – инструмента улавливания углерода из атмосферы – широко варьируются в зависимости от широтно-зональных условий местности и локальных особенностей микроклимата. В данном контексте наиболее перспективным подходом видится анализ чистой первичной продуктивности и, соответственно, возможностей улавливания углерода из атмосферы ландшафтами различных природных зон, отличающихся типами растительного покрова, почвы, микроклимата и иных ландшафтно-экологических характеристик.

Целью работы была оценка возможности поглощения углерода наземной растительностью на ключевых участках, выявление пространственно-временной вариации улавливающей способности растительного покрова в регионах исследования, представление набора регрессионных моделей зависимости поглощения углерода из атмосферы от внешних условий на участках лесостепных, степных и горных ландшафтов.

**Объекты и методы исследования**

**Участки исследования.** Исследования выполняли на семи ключевых участках, выделенных в Чеченской Республике и Оренбургской области России (рис. 1, табл. 1). Первые шесть участков в Чеченской Республике являются частью инфраструктуры для исследования баланса климатически активных газов. Седьмой участок входит в сеть особо охраняемых природных территорий Оренбургской области.

Как видно в таблице 1, участки исследования отличаются разнообразием горных, лесостепных и степных ландшафтов на различных почвах, условиями увлажнения, вариациями антропогенной нагрузки.

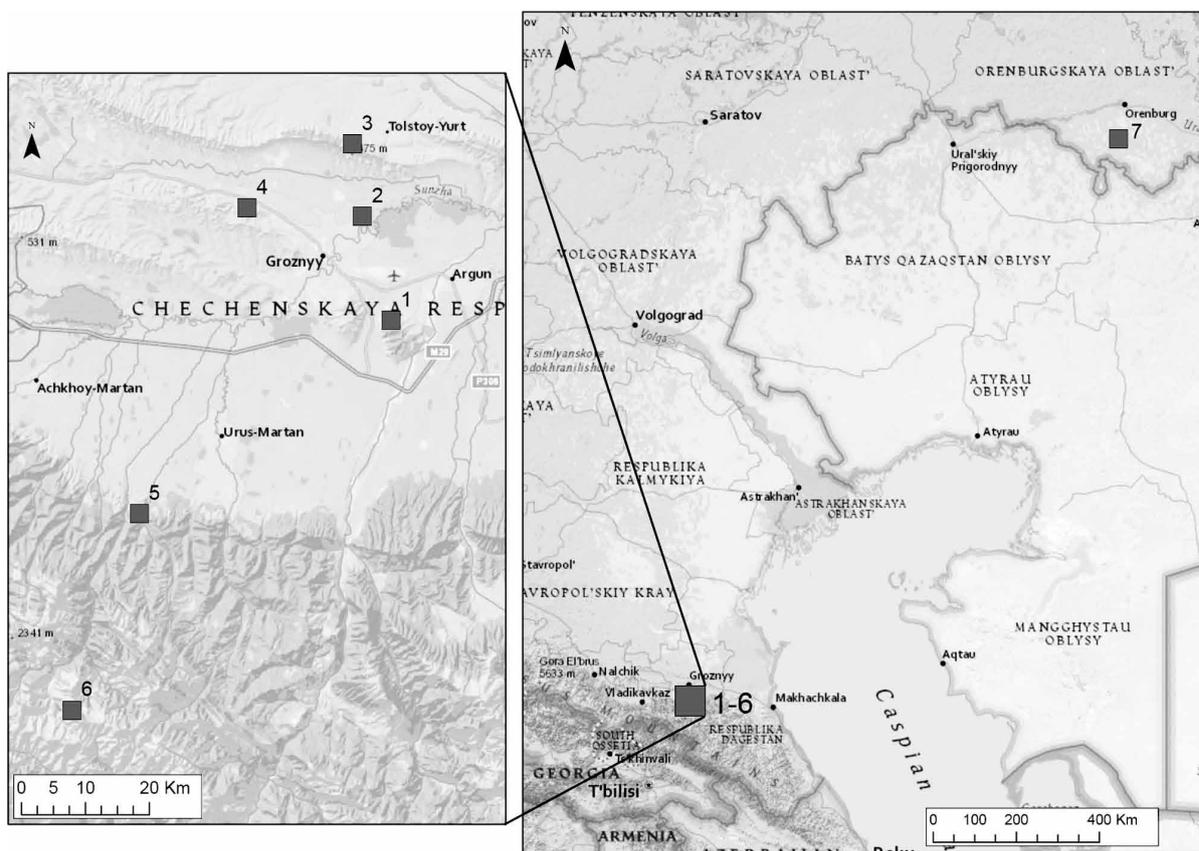
**Методы и этапы исследования.** Исследование выполнялось в два этапа.

1. Рассчитывали показатель поглощения чистого углерода растительностью ( $NPP^C$ ) на ключевых участках за каждый год многолетнего периода исследования. Исходными данными для расчётов  $NPP^C$  послужили:

– ряды чистой первичной продуктивности ( $NPP$ ) за период с 2000 по 2020 гг., полученные с помощью продуктов MOD17A3 (MOD17A3, лист h21v04), [19] с использованием тематического руководства [20];

– поглощение  $CO_2$  растительностью посредством фотосинтеза позволяет зафиксировать около 1,62 г  $CO_2$  на каждый грамм сухого вещества, а итоговое содержание углерода в сухом веществе составляет приблизительно 45% от общего показателя чистой первичной продуктивности  $NPP$  [21].

2. На основе регрессионного моделирования выявлены математические закономерности формирования объёмов поглощения чистого углерода растительным покровом в зависимости от природных условий ключевых участков исследования. Для получения входных переменных математической функции собраны массивы климато-метеорологических характеристик за 2000–2020 гг. с ближайших к ключевым участкам метеостанций. Все первичные данные обработаны для получения следующих показателей:



**Рис. 1.** Регионы и ключевые участки исследования в Республике Чечня: 1 – Ханкала, 2 – Карбоновая ферма, 3 – Толстой-Юрт, 4 – Старопромысловский, 5 – Рошни-Чу, 6 – Галанчожд; в Оренбургской области: 7 – Никольская степь  
**Fig. 1.** Regions and study plots in the Chechnya Republic: 1 – Khankala, 2 – Carbon farm, 3 – Tolstoy-Yurt, 4 – Staropromyslovsky, 5 – Roshni-Chu, 6 – Galanchozh; in the Orenburg region: 7 – Nikolskaya steppe

Таблица 1 / Table 1

Краткая характеристика ключевых участков исследования / Short description of the study plots

Номер и название участка Number and name of the plot	Сред. выс. н.у.м., м Aver. alt. ab. s.l., m	Типы ландшафтов Types of landscapes	Растительность. Антропогенное воздействие Vegetation. Anthropogenic impact	Зоны увлажнения* Humidification zones*
1. Ханкала Khankala	290	Низкогорные лесостепные ландшафты Low-mountain forest-steppe landscapes	Лесо-кустарниково-разнотравная растительность. Наличие площадки исследовательского стационара Forest-shrub-mixed vegetation. Availability of a research station	1,0 – незначительно засушливая slightly dry
2. Карбоновая ферма Carbon farm	108	Сухостепные ландшафты горной долины Dry-steppe landscapes of a mountain valley	Разнотравно-кустарниковая растительность не старше 5 лет. Участок после рекультивации техногенной пустоши Mixed grass and shrubby vegetation is not older than 5 years. The plot after the reclamation of a man-made wasteland	0,9 – незначительно засушливая slightly dry
3. Толстой-Юрт Tolstoy-Yurt	339	Низкогорные лесостепные ландшафты Low-mountain forest-steppe landscapes	Лесо-кустарниковая растительность на горном склоне. Имеется сеть автомобильных дорог, периодически выпасается скот Shrubby vegetation on a mountain slope. There is a network of roads, cattle are grazed periodically	0,9 – незначительно засушливая slightly dry
4. Старопромисловский Staropromyslovsky	263	Естественные и залежные степи межгорной котловины Natural and fallow steppes of the intermountain basin	Разнотравно-типчаково-ковыльные, разнотравно-злаково-полынные растительные сообщества. Систематически выпасается скот Mixed-grass-type grass-grass, mixed-grass-grass-wormwood plant communities. Cattle are grazed systematically	0,9 – незначительно засушливая slightly dry
5. Рошни-Чу Roshni-Chu	484	Низкогорные ландшафты горно-лесной зоны Low-mountain landscapes of the mountain-forest zone	Смешанные леса без выраженного антропогенного воздействия Mixed forests without pronounced anthropogenic impact	1,2 – обеспеченного увлажнения ensured hydration
6. Галанчожд Galanchozh	1788	Луговые степи среднегорья в приподнятой межгорной котловине Meadow steppes of the Middle mountains in an elevated intermountain basin	Разнотравье и кустарники без выраженного антропогенного воздействия Various grasses and shrubs without pronounced anthropogenic impact	1,4 – избыточного увлажнения excess moisture
7. Никольская степь Nikolskaya steppe	205	Сухостепные ландшафты сохранившейся естественной степи Dry steppe landscapes of the preserved natural steppe	Полынно-тырсово-типчаково-ковыльная растительность. Антропогенная деятельность отсутствует Polynkovo-tyrsovo-tipchakovo-kovyl'naya vegetation. There is no anthropogenic activity	< 0,6 очень засушливая very dry

Примечание: \* – на основе гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова.  
Note: \* – based on Selyaninov's hydrothermal humidification coefficient.

- годовое количество осадков в текущем году  $t$  и прошлом году  $(t-1)$ ,
- количество осадков в холодный период года с октября по март в году  $(t-1)$ ,
- количество осадков в тёплый период года с апреля по сентябрь в году  $t$ ,
- среднегодовая температура воздуха в году  $t$  и  $(t-1)$ ,
- средняя температура воздуха в холодный период года (октябрь–март) в году  $(t-1)$ ,
- средняя температура воздуха в тёплый период года (апрель–сентябрь) в году  $t$ ,
- температура исследуемой поверхности в году  $t$ ,
- продолжительность солнечного сияния в году  $t$ .

Температуру исследуемой поверхности на участках исследования определяли по тепловым каналам изображений спутников Landsat. Зависимость объёма поглощения чистого углерода растительным покровом от климато-метеорологических характеристик местности исследовали с помощью моделей множественной регрессии в кроссплатформенном программном пакете для эконометрического анализа «gretl». Предварительно ряды входящих переменных по каждому ключевому участку проверяли на стационарность, компонентный состав и характер тренда. Выбор подходящей спецификации выходных моделей осуществляли в зависимости от того, являются ли изучаемые ряды стационарными или нет, рядами типа TS (имеют детерминированный

тренд) и/или DS (стохастический тренд) в совокупности или в отдельности.

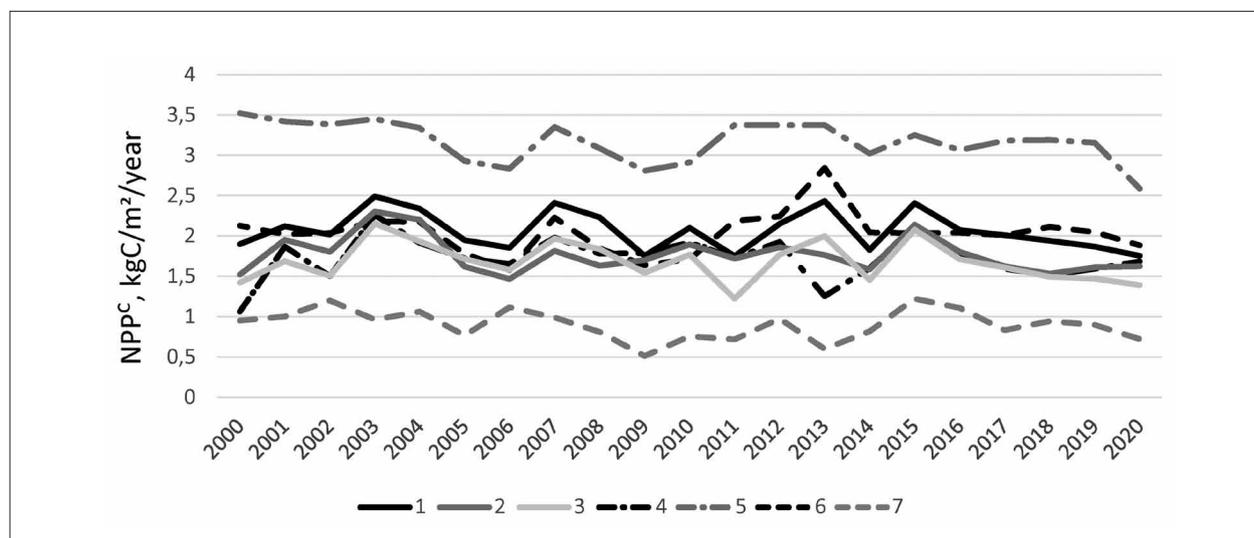
### Результаты и обсуждение

Расчитанные данные об объёмах поглощения чистого углерода растительностью ( $NPP^C$ ) для каждого ключевого участка за многолетний период представлены на рисунке 2.

Максимальные значения показателя поглощения чистого углерода (в диапазоне от 2,6 до 3,5  $kgC/m^2/год$ ) стабильно прослеживаются на участке № 5 Рошни-Чу – единственном участке из семи, полностью покрытом смешанным лесом, расположенным в хорошо увлажняемом низкогорье Чеченской Республики.

Минимальную способность к поглощению чистого углерода демонстрирует участок № 7 Никольская степь – в диапазоне от 0,5 до 1,5  $kgC/m^2/год$ . Это участок с сохранившейся естественной сухостепной растительностью в очень засушливой южной зоне Оренбургской области.

На остальных участках исследования № 1–4 и № 6, характеризующихся смешанным лесо-кустарниково-травянистым покровом, диапазон поглотительной способности колеблется от 1,1 до 2,5  $kgC/m^2/год$ . К минимальным значениям диапазона тяготеет растительный покров участков № 4 Старопромысловский и № 3 Толстой-Юрт, что вполне закономерно: участок № 4 Старопромысловский, как и уча-



**Рис. 2.** Динамика значений показателя поглощения чистого углерода растительностью ( $NPP^C$ ) на ключевых участках исследования: 1 – Ханкала, 2 – Карбоновая ферма, 3 – Толстой-Юрт, 4 – Старопромысловский, 5 – Рошни-Чу, 6 – Галанчожд, 7 – Никольская степь

**Fig. 2.** Dynamics of the index of carbon sequestration by vegetation ( $NPP^C$ ) at the study plots: 1 – Khankala, 2 – Carbon farm, 3 – Tolstoy-Yurt, 4 – Staropromyslovsky, 5 – Roshni-Chu, 6 – Galanchozh, 7 – Nikolskaya steppe

Таблица 2 / Table 2

Функциональная зависимость показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик на ключевых участках исследования  
Functional dependence of the net carbon sequestration index on climatic and meteorological characteristics at study plots

№ участка Plot No.	Название участка Plot name	Модель множественной регрессии* / Multiple regression model*
1	Ханкала Khankala	$NPP_t^C = 0,427 T_{sr_{t-1}} - 0,27 T_{sr_t} - 0,05 \Delta Os_{sr_t} - 0,037 \Delta T_{pov_t} + 0,027 Os_{tep_t} + 0,026 \Delta Os_{hol_t} + 0,02 \Delta Os_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,035) (0,039) (0,012) (0,01) (0,007) (0,003) (0,0033)</p>
2	Карбоновая ферма Carbon farm	$NPP_t^C = 0,13 T_{sr_{t-1}} - 0,046 Os_{sr_t} + 0,033 Os_{tep_t} + 0,016 \Delta Os_{hol_t} + 0,01 \Delta Os_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,015) (0,019) (0,013) (0,003) (0,003)</p>
3	Толстой-Юрт Tolstoy-Yurt	$NPP_t^C = -0,148 T_{sr_t} + 0,132 T_{tep_{t-1}} - 0,033 Os_{sr_t} - 0,029 T_{pov_t} + 0,017 Os_{tep_t} + 0,016 \Delta Os_{hol_{t-1}} + 0,01 Os_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,044) (0,026) (0,013) (0,016) (0,007) (0,003) (0,005)</p>
4	Старопромысловский Staropromyslovsky	$NPP_t^C = 0,17 T_{sr_t} - 0,14 T_{hol_t}$ <p style="text-align: center;">(0,006) (0,023)</p>
5	Рошни-Чу Roshni-Chu	$NPP_t^C = 0,25 T_{sr_{t-1}} - 0,04 \Delta T_{pov_t} + 0,01 Os_{tep_t}$ <p style="text-align: center;">(0,02) (0,01) (0,003)</p>
6	Галанчожд Galanchozh	$NPP_t^C = 0,29 T_{sr_{t-1}} - 0,14 T_{hol_t} - 0,02 Os_{hol_t} + 0,02 \Delta Os_{sr_t}$ <p style="text-align: center;">(0,03) (0,01) (0,007) (0,006)</p>
7	Никольская степь Nikolskaya steppe	$NPP_t^C = 0,086 T_{sr_t} - 0,063 T_{sr_{t-1}}$ <p style="text-align: center;">(0,03) (0,03)</p>

Примечание: \*  $NPP_t^C$  – показатель чистой первичной продуктивности в году  $t$  ( $кг/м^2$ );  $Os_{sred_t}$  – годовое количество осадков в году  $t$  (мм);  $Os_{hol_t}$  – осадки в холодный период в году  $t$  (мм);  $Os_{tep_t}$  – осадки в тёплый период в году  $t$  (мм);  $T_{sr_t}$  – среднегодовая температура воздуха в году  $t$  ( $^{\circ}$ );  $T_{hol_t}$  – средняя температура воздуха в холодный период в году  $t$  ( $^{\circ}$ );  $T_{tep_t}$  – средняя температура воздуха в тёплый период в году  $t$  ( $^{\circ}$ );  $T_{pov_t}$  – средняя температура земной поверхности в году  $t$  ( $^{\circ}$ );  $Time_{S_t}$  – продолжительность солнечного сияния в году  $t$  (ч.);  $\Delta$  – абсолютные разности между уровнями временного ряда в году  $t$  и году  $t-1$ . Верхние числа в формулах – оценки коэффициента регрессии, а нижние (в скобках) – величина стандартной ошибки. Уровень доверительной вероятности принимался равным 95%.

Note: \*  $NPP_t^C$  – the indicator of net primary productivity in the year  $t$  ( $kg/m^2$ );  $Os_{sred_t}$  – annual precipitation in the year  $t$  (mm);  $Os_{hol_t}$  – precipitation during the cold period in the year  $t$  (mm);  $Os_{tep_t}$  – precipitation during the warm period in the year  $t$  (mm);  $T_{sr_t}$  – average annual air temperature in the year  $t$  ( $^{\circ}$ );  $T_{hol_t}$  – average air temperature during the cold period in the year  $t$  ( $^{\circ}$ );  $T_{tep_t}$  – average air temperature in the warm period of the year  $t$  ( $^{\circ}$ );  $T_{pov_t}$  – the average temperature of the Earth's surface in the year  $t$  ( $^{\circ}$ );  $Time_{S_t}$  – duration of sunshine in year  $t$  (h.).  $\Delta$  – absolute differences between the levels of the time series in year  $t$  and year  $t-1$ . The upper numbers in the formulas are estimates of the regression coefficient, and the lower ones (in parentheses) are the standard error. The confidence level was assumed to be 95%.

сток № 7 Никольская степь является степным, хотя и на другой географической широте. А участок № 3 Толстой-Юрт характеризуется не интенсивной, но устойчивой антропогенной нагрузкой (дорожно-транспортная сеть и выпас скота). К максимальным значениям

диапазона стремятся показатели поглощения углерода на участках № 1 Ханкала и № 6 Галанчожд, представленные естественной луговой растительностью среднегорья (Галанчожд) и лиственным лесом низкогорья со слабым влиянием антропогенного фактора (Ханкала).

Участок № 2 Старопромысловский по показателю поглощения углерода занимает среднее положение в связи со специфической историей ландшафтного покрова: он представляет собой рекультивированную техногенную пустошь, частично озеленённую искусственно, частично зарастающую естественным образом.

Математические функции – модели множественной регрессии, описывающие закономерности формирования способности улавливать чистый углерод из атмосферы наземной фитомассой на участках исследования в зависимости от климато-метеорологических характеристик, представлены в таблице 2. Оценённые уравнения регрессии прошли проверку на статистическую значимость с использованием F-критерия Фишера-Снедекора на уровне  $p < 0,05$ . Переменные, не включённые в итоговую спецификацию моделей, оказались не значимыми, поэтому их влияние на изменение NPP<sup>C</sup> представляется несущественным.

Анализ построенных регрессионных моделей позволяет выявить некоторые закономерности формирования способности наземной фитомассы ключевых участков исследования поглощать углерод. На облесённом участке № 5 Рошни-Чу значимыми характеристиками являются средняя годовая температура в предыдущем году, количество осадков в тёплый период года (с апреля по сентябрь), абсолютная разность температур поверхности за текущий и предыдущий годы: чем она больше, тем ниже показатель поглощения углерода в текущем году.

На сухостепном участке естественной степи № 7 Никольская степь значимым фактором является лишь разница среднегодовых температур текущего и предшествующего годов. Чем она выше, тем выше поглотительная способность растительного покрова.

Такой же простой моделью зависимости поглотительной способности наземной фитомассы от условий среды отличается предгорно-степной участок № 4 Старопромысловский в незначительно-засушливой зоне: имеют значение лишь показатели средней температуры за год и за его холодный период.

На наиболее высотном среднегорном участке № 6 Галанчож способность смешанного растительного покрова поглощать углерод формируется в зависимости от температурных характеристик местности и объёма осадков.

Наиболее сложные функциональные зависимости поглотительной способности наземной фитомассы от климато-метеорологических

условий наблюдаются на участках № 1 Ханкала, № 2 Карбоновая ферма, № 3 Толстой-Юрт – здесь имеют значение от 5 до 7 входных параметров. Возможно, это объясняется тем, что три указанных участка являются и наиболее сложными в отношении антропогенной нагрузки, условий формирования и состава растительного покрова.

## Заключение

Предгорный участок в Республике Чечня с многолетним смешанным лесом в условиях обеспеченного увлажнения и отсутствия антропогенной нагрузки демонстрирует максимальную способность к улавливанию углерода из атмосферы. Построенная регрессионная модель зависимости показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик, включающая три параметра, является достаточно универсальной и позволяет осуществлять аналогичное моделирование поглощения чистого углерода на участках со схожими природно-климатическими условиями.

Участок естественной многолетней сухой степи в Оренбургской области характеризуется минимальной способностью к улавливанию углерода. Регрессионная модель зависимости показателя поглощения чистого углерода от климато-метеорологических характеристик включает лишь два метеопараметра, демонстрируя стабильность свойств растительного покрова, и может применяться для степных участков со схожими природно-климатическими характеристиками. Стабильность характеристик степного растительного покрова в части поглощения углерода подтверждает и степной участок незначительно-засушливой зоны в Республике Чечня, для которого форма зависимости поглотительной способности от внешних условий является достаточно простой, поскольку в оценённую модель вошло небольшое количество факторов.

На наиболее высотном из исследуемых – среднегорном участке в Чеченской Республике наблюдается простая функциональная зависимость формирования показателя улавливания чистого углерода от климато-метеорологических характеристик, что также свидетельствует о стабильности поглотительных свойств наземной фитомассы. Модель может использоваться для среднегорных антропогенно незатронутых участков со схожими природно-климатическими характеристиками.

Для остальных ключевых участков со смешанным растительным покровом и периодически систематическим разнородным антропогенным воздействием регрессионное моделирование показателя поглощения чистого углерода выявило его многофакторную зависимость, включающую от 5 до 7 климато-метеорологических характеристик. Наиболее целесообразно использовать такие модели на аналогичных участках при необходимости рассчитать объёмы поглощения углерода в первом приближении. Затем необходимо вводить в расчёты дополнительные независимые переменные – факторы воздействия, вносящие корректировки на локальном уровне.

Полученные результаты призваны помочь в разработке решений по оптимизации природопользования в лесостепных, степных и горных ландшафтах.

*Работа выполнена в рамках гос. задания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0002 (в части исследования ключевых участков №№ 1-6) и гос. задания Института степи УрО РАН ОФИЦ УрО РАН № ГР АААА-А21-121011190016-1 (в части исследования ключевого участка № 7).*

## References

1. Lal R. Carbon sequestration // Philosophical transactions of the Royal Society B. Biological Sciences. 2007. V. 363. P. 815–830. doi: 10.1098/rstb.2007.2185.2
2. Kintisch E. New congress may be warming up to plans for capping emissions // Science. 2007. V. 315. No. 5811. Article No. 444. doi: 10.1126/science.315.5811.444
3. Kluger J. Global warming: what now? Our feverish planet badly needs a cure // Time Magazine. 2007. V. 9. P. 50–109.
4. Walsh B. Greenhouse airlines: traveling by jet is a dirty business. As passenger load increases, enviros look for ways to cut back the carbon // Time. 2007 [Internet resource] <https://time.com/archive/6596793/greenhouse-airlines/> (Accessed: 07.11.2024).
5. 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
6. Schrag D.P. Preparing to capture carbon // Science. 2007. V. 315. P. 812–813. doi: 10.1126/science.1137632
7. Cramer W., Kicklighter D.W., Bondeau A., Iii B.M., Churkina G., Nemry B., Ruimy A., Schloss A.L. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results // Global Change Biology. 1999. V. 5. No. S1. P. 1–15. doi: 10.1046/j.1365-2486.1999.00009.x
8. Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model // Global Change Biology. 2003. V. 9. No. 2. P. 161–185. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00569.x
9. Eze S., Palmer S.M., Chapman P.J. Soil organic carbon stock and fractional distribution in upland grasslands // Geoderma. 2018. V. 314. P. 175–183. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.11.017
10. Rahmayanti M.A., Jauhari A., Fitriani A. Estimasi stok karbon dan serapan CO<sub>2</sub> di area revegetasi pit mangkalapi pt arutmin indonesia tambang batulicin // Jurnal Sylva Scientiae. 2021. V. 4. No. 5. P. 902–909 (in Indonesian). doi: 10.20527/jss.v4i5.4213
11. Koller M., Upadhyaya S.K. Relationship between modified normalized difference vegetation index and leaf area index for processing tomatoes // Applied Engineering in Agriculture. 2005. V. 21. No. 5. P. 927–933. doi: 10.13031/2013.19696
12. Xiao X., Hollinger D., Aber J., Goltz M., Davidson E. A., Zhang Q., Moore B., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest // Remote Sensing of Environment. 2004. V. 89. No. 4. P. 519–534. doi: 10.1016/j.rse.2003.11.008
13. Gelybó Gy., Barcza Z., Kern A., Kljun N. Effect of spatial heterogeneity on the validation of remote sensing based GPP estimations // Agricultural and Forest Meteorology. 2013. V. 174–175. P. 43–53. doi: 10.1016/j.agrformet.2013.02.003
14. Ren H., Shang Y., Zhang S. Measuring the spatiotemporal variations of vegetation net primary productivity in Inner Mongolia using spatial autocorrelation // Ecological Indicators. 2020. V. 112. Article No. 106108. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106108
15. Junttila S., Kelly J., Kljun N., Aurela M., Klemmedtsson L., Lohila A., Nilsson M.B., Rinne J., Tuittila E.-S., Vestin P., Weslien P., Eklundh L. Upscaling Northern Peatland CO<sub>2</sub> fluxes using satellite remote sensing data // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 4. Article No. 818. doi: 10.3390/rs13040818
16. Kross A., Seaquist J.W., Roulet N.T., Fernandes R., Sonntag O. Estimating carbon dioxide exchange rates at contrasting northern peatlands using MODIS satellite data // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 137. P. 234–243. doi: 10.1016/j.rse.2013.06.014
17. Schubert P., Eklundh L., Lund M., Nilsson M. Estimating northern peatland CO<sub>2</sub> exchange from MODIS time series data // Remote Sensing Environment. 2010. V. 114. No. 6. P. 1178–1189. doi: 10.1016/j.rse.2010.01.005

18. Chen J., Fan W., Li D., Liu X., Song M. Driving factors of global carbon footprint pressure: Based on vegetation carbon sequestration // *Applied Energy*. 2020. V. 267. Article No. 114914. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114914

19. Database of NASA's Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) // The United States Geological Survey. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center [Internet recourse] e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/MOD17A3HGF.061/ (Accessed: 22.03.2023).

20. Running S., Mu Q. University of Montana, Maosheng Zhao – University of Maryland and MODAPS SIPS – NASA. MOD17A3 MODIS/Terra Gross Primary Productivity Yearly L4 Global 1km SIN Grid. NASA LP DAAC. 2015. doi: 10.5067/MODIS/MOD17A3.006

21. Chen J., Gao M., Cheng S., Hou W., Song M., Liu X., Liu Y., Shan Y. County-level CO<sub>2</sub> emissions and sequestration in China during 1997–2017 // *Scientific Data*. 2020. V. 7. No. 1. Article No. 391. doi: 10.1038/s41597-020-00736-3

## Современное состояние древесного яруса среднетаёжных хвойных и лиственных насаждений (на примере тестового полигона «Ляльский», Республика Коми)

© 2024. А. В. Манов, к. с.-х. н., н. с.,  
А. Ф. Осипов, к. б. н., с. н. с., С. В. Загирова, д. б. н., зав. отделом,  
Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: manov@ib.komisc.ru

Леса занимают доминирующее положение в растительном покрове Республики Коми и играют ключевую роль в поддержании экологического равновесия в Субарктическом регионе. В последние десятилетия они подвергаются интенсивному освоению и техногенному воздействию, что приводит к деградации и уничтожению значительных площадей таёжных лесов. Основными факторами, влияющими на состав, структуру и состояние этих лесов, являются рубки, пожары, ветровалы, вредители, болезни, аэротехногенные выбросы промышленных предприятий и объектов энергетики. Применение ландшафтного подхода в мониторинге и охране таёжных лесов предполагает оценку виталитетной структуры древостоев. Целью данной работы стала оценка жизненного состояния древостоев хвойных и лиственных лесов на тестовом полигоне «Ляльский», организованном в 2023 г. в средней тайге Республики Коми. Исследования проводили на 29 постоянных пробных площадях, заложенных в наиболее распространённых типах леса в регионе. Территория тестового полигона покрыта приспевающими и спелыми еловыми и сосновыми формациями, а также перестойными березняками и осинниками. Эти насаждения формируют смешанные по составу, средне- и низкобонитетные, разновозрастные древостои, представляющие различные типы растительных сообществ с разным уровнем влажности. Результаты показали, что древостои на территории полигона в целом характеризуются как здоровые, с высокими показателями жизнеспособности деревьев. Лишь на отдельных участках с участием лиственных пород (берёзы, осины) отмечено незначительное ослабление их состояния, что обусловлено сохранением старых экземпляров деревьев или конкурентными взаимоотношениями между молодыми особями. Полученные результаты будут использованы для сопоставления данных о жизненном состоянии деревьев с оценками запасов фитомассы и углерода в лесах на особо охраняемых природных территориях, а также послужат основой для долговременного мониторинга на ландшафтном уровне.

**Ключевые слова:** средняя тайга, лесные экосистемы, жизненное состояние древостоев, ландшафтный подход, мониторинг лесов.

## Current state of the tree layer of middle taiga coniferous and deciduous forests (case-study of the test site “Lyalsky”, Komi Republic)

© 2024. A. V. Manov <sup>ORCID: 0000-0002-5070-0078</sup>  
A. F. Osipov <sup>ORCID: 0000-0003-0618-9660</sup>, S. V. Zagirova <sup>ORCID: 0000-0002-3304-4160</sup>  
Institute of Biology of Komi Scientific Centre  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: manov.komi@gmail.com

Forests occupy a dominant position in the vegetation cover of the Komi Republic and play a key role in maintaining ecological balance in the Subarctic region. In recent decades they have been subjected to intensive development and technogenic impact, which leads to degradation and destruction of significant areas of taiga forests. The main factors affecting the composition, structure and condition of these forests are logging, fires, windthrow, pests, diseases, aerotechnogenic emissions from industrial enterprises and energy facilities. Application of the landscape approach to monitoring and protection of taiga forests implies assessment of vitality structure of stands. The aim of this work was to assess the vital state of stands of coniferous and deciduous forests at the test site “Lyalsky”, organized in 2023 in the middle taiga of the Komi Republic. The research was carried out on 29 permanent sample plots created in the most common forest types in the region. The test site territory is covered with mature and ripe spruce and pine formations, as well as overmatures birch and aspen forests. These stands form mixed, medium- and low bonitet, mixed-age stands representing different types of

plant communities with different moisture levels. The results show that the stands on the site are generally characterized as healthy, with high tree vigour. Only in some areas with deciduous species (birch, aspen) there is a slight weakening of their condition, which is due to the preservation of old specimens of trees or competitive relationships between young individuals. The results obtained will be used to compare data on the vital state of trees with estimates of phytomass and carbon stocks in forests in specially protected areas, and will also serve as a basis for long-term monitoring at the landscape level.

**Keywords:** middle taiga, forest ecosystems, vital state of stands, landscape approach, forest monitoring.

Леса Республики Коми занимают доминирующее положение в растительном покрове и играют ключевую роль в поддержании экологического равновесия в Субарктическом регионе [1]. В прошлом основными факторами, влияющими на состав, структуру и состояние этих лесов, а также на динамику лесообразовательных процессов, были рубки, пожары, ветровалы и поражающие деревья насекомые и грибные заболевания. Однако за последние 50 лет стало очевидно, что наиболее разрушительное воздействие на природные комплексы данного региона оказывают интенсивное освоение и транспортировка минеральных и углеводородных ресурсов, что приводит к деградации и уничтожению значительных площадей таёжных лесов. Также негативный эффект оказывают аэротехногенные выбросы промышленных предприятий, объектов энергетики и транспорта. В последние годы на западе Республики Коми наблюдается массовое усыхание ели, распространившееся с Архангельской области [2].

В условиях сильного загрязнения атмосферы выбросами  $SO_2$  с примесями тяжёлых металлов наблюдается снижение ростовых процессов у хвойных растений на 40–70% [3]. Единственным способом повысить и, возможно, восстановить жизнеспособность лесных сообществ до первоначального уровня является сокращение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, например, путём модернизации очистных сооружений.

Лесные биогеоценозы (экосистемы) являются открытыми системами, взаимосвязанными с окружающей средой разнообразными потоками вещества и энергии [4]. Это обуславливает то, что даже локальные техногенные нарушения могут распространяться на региональном и даже глобальном уровне через «транспортные» сети (циркуляцию атмосферы, влагооборот, сток, миграцию организмов и др.). Поэтому мониторинг лесных сообществ и их защита должны основываться на учёте местных ландшафтных особенностей, типов леса и структурно-функциональной организации фитоценозов, с применением ландшафтного подхода [5]. Одной из главных

целей лесного мониторинга является оценка состояния древесного полога [6].

В рамках создания Национальной системы мониторинга динамики климатически активных веществ в наземных экосистемах РФ [7] в 2023 г. был организован тестовый полигон «Ляльский», на территории которого проводилась оценка жизненного состояния древостоев хвойных и лиственных лесов.

Цель работы – оценка жизненного состояния древесного полога лесных экосистем на территории полигона «Ляльский» в условиях средней тайги Республики Коми.

### Объекты и методы исследования

Тестовый полигон «Ляльский» размерами 2×2 км расположен в западной части Республики Коми, в пределах Средне-Восточного лесотаксационного района европейской части России (62°15' с. ш., 50°41' в. д.). Территория полигона входит в границы государственного природного заказника регионального значения с одноимённым названием.

Территория Ляльского тестового полигона характеризуется относительно плоским рельефом с уклонами 1–3°, прорезанным долинами ручьёв и покрытым лесной растительностью. Здесь преобладают подзолистые почвы, сформированные на двучленных и одночленных отложениях [8]. Помимо этого, на почвенно-растительные условия оказали влияние сельскохозяйственные и техногенные воздействия, имевшие место на рубеже XIX–XX веков, а также пожары и рубки. Климат района исследований характеризуется как умеренно континентальный с продолжительной и многоснежной зимой. Лето в этих условиях короткое и умеренно тёплое, а весна и осень – длительные и холодные. Обилие осадков на фоне слабого испарения приводит к избыточной влажности климата и почвы. Световой период в летние месяцы длится практически круглые сутки, что обуславливает увеличение суммы фотосинтетически активной радиации (ФАР) и снижение перепадов температуры в течение суток. Преобладающими являются ветры южного и юго-западного направлений [9].

Исследования жизненного состояния лесов на Ляльском тестовом полигоне проводили на 29 постоянных пробных площадях (ППП) размерами 50×50 м, заложенных в наиболее распространённых типах леса в соответствии с методическими указаниями [10]. Краткая характеристика древостоев хвойных и мелколиственных насаждений приведена в таблице 1.

Естественное возобновление в исследованных фитоценозах представлено теми же видами, что образуют материнский полог. Подрост характеризуется различными показателями в зависимости от типов леса. Под пологом еловых древостоев развивается подрост разной величины, его количество колеблется в широких пределах, от 3,2 до 9,9 тыс. шт./га. Слабый возобновительный процесс отмечен в сосняках (0,5–3,1 тыс. шт./га). Наилучшее возобновление ели выявлено в мелколиственных насаждениях, где количество подроста составляет 3,2–14,3 тыс. шт./га. Подлесочные породы преимущественно имеют групповое размещение одного вида по площади. В подлеске в небольшом количестве присутствуют жимолость, ива, можжевельник, рябина и шиповник. Валежник и пни представлены всеми древесными породами тестового полигона. Запасы валежника в отдельных типах леса достигают 104,5 м<sup>3</sup>/га. Численность пней варьирует от 0 до 200 шт./га. Стадия разложения валежника и пней в среднем соответствует 2.

На каждой ППП проведён сплошной перебор деревьев. Высоты деревьев измеряли у 15–20 деревьев каждого элемента леса. Возраст деревьев определяли по кернам, путём подсчёта числа годичных слоёв. Для основного элемента леса возраст определяли у 3–5 средних модельных деревьев, а для сопутствующих элементов леса – у 1–3 средних деревьев. Категорию санитарного состояния устанавливали для всех деревьев согласно приложению 1 к Правилам санитарной безопасности в лесах (Постановление Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 года № 2047).

Анализ экологической структуры древостоев на территории полигона «Ляльский» проводили с применением методики, основанной на визуальной оценке состояния деревьев по характеристикам их крон и соответствующим коэффициентам жизнестойкости [11]. Этот метод был разработан для мониторинга состояния древостоев как в повреждённых, так и в фоновых насаждениях, где структура древесной растительности в значительной степени определяется процессами конкуренции

за жизненное пространство и питательные вещества. Данный подход широко используется в качестве информативного показателя состояния лесов при проведении их мониторинга [7].

При оценке состояния древостоев предлагается присваивать определённые коэффициенты для каждого дерева, отражающие их жизненный и продукционный потенциалы. Эти коэффициенты в первую очередь зависят от объёма способных к нормальному функционированию ассимиляционных органов у растений. Коэффициент здорового дерева приравнивается к 100%, а сухостоя – к нулю. Для деревьев с промежуточными состояниями указываются соответствующие им коэффициенты. При расчётах учитывался только свежий сухостой, так как в первые годы после гибели он ещё оказывает определённое влияние на функционирование древостоя [11].

Индексы жизненного состояния древостоев рассчитывают как по числу деревьев, так и по объёму стволовой древесины. Относительное жизненное состояние древостоя вычислялось по формуле [11]:

$$L_n = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N,$$

где  $L_n$  – жизненное состояние древостоя, %;  $n_1, n_2, n_3, n_4$  – количество здоровых, ослабленных, сильно ослабленных и отмирающих деревьев на 1 га соответственно;  $N$  – общее количество деревьев на 1 га, за исключением старого сухостоя.

При значении  $L_n = 100–80\%$  жизненное состояние древостоя считается здоровым, при значении 79–50 – ослабленным, при значении 49–20 – сильно ослабленным, при значении  $\leq 19\%$  – древостой полностью разрушен.

Анализ жизненного состояния древостоев по объёму стволовой древесины ( $L_v$ ) осуществлялся той же формуле и коэффициентам, что и для числа деревьев.

Термин «жизненное состояние» или «жизненность» (деревьев, древостоя) нами трактуется как параметр морфометрических характеристик роста и развития деревьев в момент наблюдения за ними.

## Результаты и обсуждение

Древостой является главным компонентом лесных насаждений, поэтому его состояние имеет важнейшее значение для «здоровья» всего растительного сообщества. Территория тестового полигона «Ляльский» покрыта приспевающими и спелыми еловыми и со-

Таблица 1 / Table 1

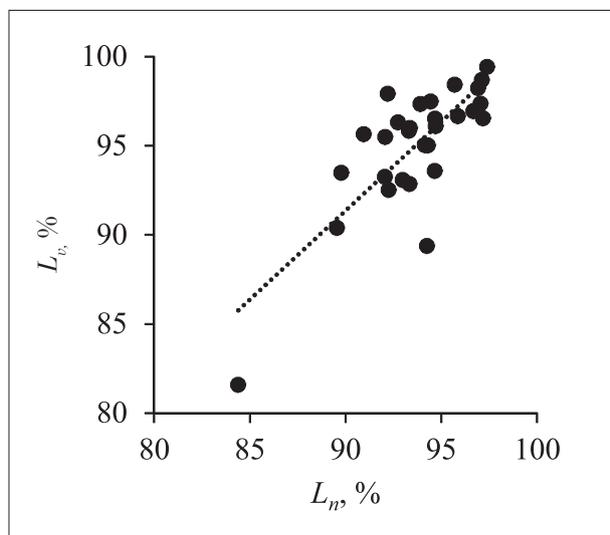
Таксационная характеристика древостоев / Taxation characteristics of forest stands

№ ППП Constant sample area	Тип леса Forest type	Состав древостоя Forest stands' composition	Класс возраста Age class	Средний Mean		Полнота абсолютная, м <sup>2</sup> /га Basal area, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	Запас, м <sup>3</sup> /га Growing stock, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Класс бонитета Capacity class
				диаметр, см diameter, cm	высота, м height, m			
Ельники / Spruce forests								
14	Черничный свежий Bilberry	4ЕЗБ2Ос1С ед. Пх	IV	16,9	16,1	35,2	357,2	III
40	Травяно- черничный Grass- bilberry	4Е4Ос1С1Б ед. Пх	IV	18,8	18,5	35,1	370,1	III
51	Травяно- сфагновый Grass- sphagnum	7Е1Пх1Б1Ос ед. С	VI	22,7	18,5	32,9	369,7	IV
82	Травяной Grass	4Е4Ос2Б+Пх	IV	17,6	17,4	35,1	370,5	III
88	Черничный свежий Bilberry	4Е4Б2С ед. Пх, Ос	V	22,1	18,5	40,3	430,9	IV
115	Травяной Grass	8Е1Пх1Б+С	V	20,2	16,5	28,6	309,3	IV
145	Сфагново- черничный Sphagnum- bilberry	8Е1Пх1Б ед. Ос	V	17,4	15,7	29,5	301,4	IV
157	Таволговый Meadowsweet	5ЕЗБ2Пх+С ед. Ос	IV	16,7	14,4	28,9	290,5	IV
163	Кустарничково- сфагновый Shrubby- sphagnum	7Е1Пх1Б1Ос	V	20,5	17,8	32,7	358,4	IV
179	Кустарничково- сфагновый Shrubby- sphagnum	8Е1Пх1Б	V	21,4	18,4	30,2	325,3	IV
180	Кустарничково- сфагновый Shrubby- sphagnum	8Е2Б+Пх ед. С	V	21,0	17,6	28,2	301,3	IV
208	Сфагново- черничный Sphagnum- bilberry	7ЕЗС+Б	IV	13,5	11,9	17,2	146,8	IV
270	Сфагново- черничный Sphagnum- bilberry	8Е1С1Б	IV	12,6	11,5	21,2	163,9	V
293	Чернично- долгомошный Bilberry- longhorn	4ЕЗОс2Б1С	IV	14,7	15,4	31,8	290,9	IV
298	Черничный свежий Bilberry	5ЕЗБ1Пх1Ос	IV	15,6	16,0	38,1	358,3	IV

№ ППП Constant sample area	Тип леса Forest type	Состав древостоя Forest stands' composition	Класс возраста Age class	Средний Mean		Полнота абсолютная, м <sup>2</sup> /га Basal area, m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	Запас, м <sup>3</sup> /га Growing stock, m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Класс бонитета Capacity class
				диаметр, см diameter, cm	высота, м height, m			
335	Травяно-сфагновый Grass-sphagnum	8Е2Б+Пх ед. С	IV	14,9	14,1	24,2	219,4	V
Сосняки / Pine forests								
38	Черничный влажный Bilberry moist	10С+Е ед. Б,Ос	IV	15,0	15,0	27,8	237,4	IV
86	Черничный свежий Bilberry	8С1Е1Ос+Б	IV	12,5	13,1	24,4	197,7	IV
114	Черничный свежий Bilberry	8С1Е1Б+Ос	IV	12,5	13,1	23,2	188,6	III
228	Черничный влажный Bilberry moist	10С ед.Е	IV	11,9	13,4	13,7	103,4	IV
233	Сфагново-черничный Sphagnum-bilberry	8С2Е ед.Пх,Б,Ос	IV	11,6	10,9	18,3	138,3	IV
237	Черничный влажный Bilberry moist	9С1Е ед.Б	IV	13,7	14,1	21,1	172,9	IV
243	Черничный свежий Bilberry	10С+Е ед.Б	IV	13,9	14,5	28,2	234,3	IV
280	Черничный влажный Bilberry moist	8С1Е1Б ед.Ос	IV	14,1	13,9	27,5	227,4	IV
346	Кустарничково-сфагновый Shrubby-sphagnum	9С1Б ед.Е	IV	15,1	15,0	22,1	192,5	IV
Березняки / Birch forests								
5	Травяной Grass	4Б4Ос2Е+Пх ед.С	VII	15,8	16,5	35,9	360,3	III
319	Разнотравно-черничный Grass-bilberry	4Б3Е3Ос+С ед.Пх	VII	15,2	14,7	29,3	273,0	IV
Осинники / Aspen forests								
266	Черничный свежий Bilberry	7Ос2Е1Б ед.С	VII	16,0	16,7	37,6	394,6	III
284	Черничный влажный Bilberry moist	6Ос2Е2Б+С ед.Пх	VII	13,7	14,7	41,9	387,7	IV

Примечание. Формула состава древостоя: Е – ель сибирская; С – сосна обыкновенная; Пх – пихта сибирская; Б – берёзы пушистая и повислая; Ос – осина обыкновенная. Единица коэффициента состава соответствует 10% запаса данной породы в общем запасе древостоя. Доля участия породы: «+» – 2–5%; «ед.» – <2%.

Note. The formula for the forest stand composition: Е – *Picea obovata*; С – *Pinus sylvestris*; Пх – *Abies sibirica*; Б – *Betula pubescens*, *B. pendula*; Ос – *Populus tremula*. One composition coefficient unit equal to 10% of the corresponding species stock in the total growing stock. The participation share of species: «+» – 2–5%; «ед.» – <2%.



**Рис. 1.** Показатели жизненного состояния древостоев, полученные разными методами подсчёта:  $L_v$  – на основе объёма стволов;  $L_n$  – на основе количества деревьев  
**Fig. 1.** Indicators of forest stand health obtained by different counting methods:  $L_v$  – by stem volume;  $L_n$  – by number of trees

сновыми формациями, а также перестойными березняками и осинниками. Эти насаждения формируют смешанные по составу, средне- и низкобонитетные, разновозрастные древостои, представляющие различные типы растительных сообществ с разным уровнем увлажнения почв. Запас древесины ельников варьирует от 103 до 431 м<sup>3</sup>/га, со средним значением – 277 м<sup>3</sup>/га, а сосняков – от 164 до 388 м<sup>3</sup>/га, в среднем – 263 м<sup>3</sup>/га соответственно. Продуктивность берёзовых насаждений высокая – в среднем 359 м<sup>3</sup>/га, тогда как осиновых – ниже, порядка 204 м<sup>3</sup>/га (табл. 1).

Сопоставление двух методов оценки жизненного состояния древостоев – по числу деревьев ( $L_n$ ) и объёму стволовой древесины ( $L_v$ ) – показало, что максимальное расхождение между ними составляет всего 6,2%, а в среднем 1,4% (рис. 1). Это свидетельствует о том, что оба метода отражают схожую характеристику жизненного состояния древостоев на полигоне «Ляльский».

Хвойные насаждения преобладают на территории тестового полигона. В таблице 2 представлены значения жизненного состояния древесных пород в древостоях ельников, сосняков, березняков и осинников, распределённых по группам типов леса в порядке ухудшения лесорастительных условий. В целом, все исследованные древостои относятся к категории «здоровых» ( $L \geq 80\%$ ). Вместе с тем, берёза, произрастающая в ельнике

черничном свежем (ППП 88), характеризуется как ослабленная ( $50 \leq L \leq 79\%$ ), что связано с наличием в насаждении большого количества старых деревьев. Признаки ослабления лиственных пород проявляются также в ельнике черничном свежем (ППП 298), сосняках черничных свежих (ППП 86, 114, 243) и влажном (ППП 38), где молодые деревья лиственных пород находятся в стадии активного отпада вследствие конкурентных взаимоотношений за жизненное пространство. Ослабленные деревья сосны в ельнике травяном (ППП 115) и осины в ельнике травяно-сфагновом (ППП 51) представлены лишь единичными экземплярами, не оказывающими заметного влияния на общее состояние древостоев. В лиственных насаждениях все слагающие их породы оценены как здоровые. В целом, во всех исследованных насаждениях деревья преобладающей породы характеризуются как здоровые.

Общее состояние лесов тестового полигона «Ляльский» в настоящее время оценивается как удовлетворительное. По результатам полевых наблюдений на данной территории не выявлены очаги вредителей и болезней леса, не зафиксированы свежие ветровалы, вырубki и гари, а также не проводятся какие-либо мероприятия по уходу за лесами. Леса на территории полигона находятся в сходном санитарном состоянии. Показатели жизнестойкости древостоев характеризуются низкой изменчивостью (табл. 3). Значения коэффициента вариации изменяются от 2,0% в сосновых насаждениях до 3,6% в еловых насаждениях, если рассчитывать по количеству деревьев, и немного выше – от 2,6 в сосновых до 4,4% в еловых насаждениях, если рассчитывать по запасу древесины.

Жизненное состояние деревьев в значительной мере зависит от их высоты: более высокие деревья находятся в лучших условиях, чем те, которых они обогнали в росте и начинают подавлять [12–14]. Так, с увеличением высоты деревьев наблюдается улучшение их состояния, но при этом отмечается резкое снижение жизнестойкости у деревьев, достигших максимальных высот, что характерно для осины (рис. 2). Отпад деревьев на территории полигона происходит постепенно после гибели отдельных экземпляров, достигших предельного возраста или ослабленных в результате воздействия энтомофитов либо дереворазрушающих грибов, что приводит к накоплению крупных древесных остатков [15].

Таблица 2 / Table 2

Характеристика жизненного состояния (L, %) разновозрастных древостоев полигона «Ляльский»  
 Characteristics of living condition (L, %) of different-aged stands of the Lyalsky polygon

№ ППП Permanent sample plot	Тип леса Forest type	Порода / Species					Всего Total
		ель spruce	пихта fir	сосна pine	берёза birch	осина aspen	
14	Ельник черничный свежий Bilberry spruce	<u>91,3</u>	<u>100</u>	<u>88,5</u>	<u>87,2</u>	<u>84,3</u>	<u>89,6</u>
		97,2	100	97,4	81,2	85,3	90,4
88	Ельник травяно-черничный Grass-bilberry spruce	<u>95,5</u>	<u>94,4</u>	<u>93,6</u>	<u>54,2</u>	<u>100</u>	<u>84,4</u>
		99,6	90,7	91,1	52,8	100	81,6
298	Ельник травяно-сфагновый Grass-sphagnum spruce	<u>92,3</u>	<u>92,0</u>	–	<u>95,7</u>	<u>76,9</u>	<u>93,4</u>
		96,9	93,7	–	98,1	79,1	96,0
40	Ельник травяной Grass spruce	<u>92,4</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>87,3</u>	<u>96,4</u>	<u>93,3</u>
		94,6	100	100	84,0	91,3	92,8
82	Ельник черничный свежий Bilberry spruce	<u>95,7</u>	<u>100</u>	–	<u>92,0</u>	<u>93,2</u>	<u>94,3</u>
		91,6	100	–	86,6	88,4	89,4
115	Ельник травяной Grass spruce	<u>94,4</u>	<u>93,2</u>	<u>77,5</u>	<u>97,5</u>	–	<u>94,2</u>
		98,0	85,9	58,3	91,7	–	95,0
145	Ельник сфагново-черничный Sphagnum-bilberry spruce	<u>98,1</u>	<u>98,0</u>	–	<u>93,3</u>	<u>100</u>	<u>97,1</u>
		99,2	99,9	–	83,6	100	97,4
208	Ельник таволговый Meadowsweet spruce	<u>96,6</u>	–	<u>100</u>	<u>94,1</u>	–	<u>96,7</u>
		96,0	–	100	90,8	–	96,9
270	Ельник кустарничково- сфагновый Shrubby-sphagnum spruce	<u>97,4</u>	–	<u>100</u>	<u>93,6</u>	–	<u>97,2</u>
		98,0	–	100	83,7	–	96,5
293	Ельник кустарничково- сфагновый Shrubby-sphagnum spruce	<u>96,7</u>	–	<u>100</u>	<u>98,0</u>	<u>96,9</u>	<u>97,1</u>
		98,6	–	100	98,2	98,9	98,7
163	Ельник кустарничково- сфагновый Shrubby-sphagnum spruce	<u>92,7</u>	<u>95,9</u>	–	<u>91,8</u>	<u>80,4</u>	<u>92,1</u>
		96,6	97,5	–	87,1	76,7	93,3
179	Ельник сфагново- черничный Sphagnum-bilberry spruce	<u>96,2</u>	<u>95,9</u>	–	<u>93,3</u>	–	<u>95,9</u>
		98,7	89,8	–	88,0	–	96,6
180	Ельник сфагново- черничный Sphagnum-bilberry spruce	<u>96,6</u>	<u>94,4</u>	<u>100</u>	<u>80,9</u>	–	<u>94,3</u>
		99,3	95,6	100	76,3	–	95,0
157	Ельник чернично- долгомошный Bilberry-longhorn spruce	<u>93,2</u>	<u>97,5</u>	<u>100</u>	<u>93,4</u>	<u>100</u>	<u>94,7</u>
		93,2	94,5	100	92,8	100	93,6
51	Ельник черничный свежий Bilberry spruce	<u>91,4</u>	<u>82,4</u>	<u>100</u>	<u>93,6</u>	<u>77,5</u>	<u>89,8</u>
		96,9	84,7	100	92,4	72,5	93,5
335	Ельник травяно-сфагновый Grass-sphagnum spruce	<u>94,7</u>	<u>88,2</u>	<u>100</u>	<u>96,2</u>	–	<u>94,7</u>
		95,3	98,8	100	99,1	–	96,1
86	Сосняк черничный влажный Bilberry moist pine	<u>99,3</u>	–	<u>96,7</u>	<u>89,1</u>	<u>61,0</u>	<u>92,1</u>
		97,0	–	99,0	92,3	51,4	95,5
114	Сосняк черничный свежий Bilberry pine	<u>97,7</u>	–	<u>99,0</u>	<u>79,5</u>	<u>73,8</u>	<u>92,7</u>
		98,2	–	99,6	77,6	71,5	96,3
243	Сосняк черничный свежий Bilberry pine	<u>94,6</u>	–	<u>95,1</u>	<u>67,2</u>	–	<u>94,4</u>
		96,7	–	97,7	77,0	–	97,5
38	Сосняк черничный влажный Bilberry moist pine	<u>100</u>	–	<u>94,8</u>	<u>63,6</u>	<u>62,5</u>	<u>92,2</u>
		100	–	98,9	74,9	63,4	97,9
228	Сосняк сфагново- черничный Sphagnum-bilberry pine	<u>100</u>	–	<u>92,1</u>	–	–	<u>92,3</u>
		100	–	92,5	–	–	92,5

№ ППП Permanent sample plot	Тип леса Forest type	Порода / Species					Всего Total
		ель spruce	пихта fir	сосна pine	берёза birch	осина aspen	
237	Сосняк черничный влажный Bilberry moist pine	95,5	–	94,8	87,5	–	94,7
		99,0		96,3	98,0		96,5
280	Сосняк черничный свежий Bilberry pine	98,6	–	98,1	92,4	100	97,4
		99,7		99,5	97,3	100	99,4
233	Сосняк черничный влажный Bilberry moist pine	94,6	100	97,7	88,5	100	95,7
		98,5	100	98,5	91,6	100	98,4
346	Сосняк кустарничково- сфагновый Shrubby-sphagnum pine	100	–	93,7	88,6	–	93,3
		100		95,9	94,2		95,8
319	Березняк травяной Grass birch	94,8	100	100	94,0	90,5	93,9
		98,4	100	100	96,7	96,5	97,3
5	Березняк разнотравно- черничный Grass- bilberry birch	84,5	95,5	100	94,5	87,8	91,0
		90,8	98,4	100	96,2	96,7	95,6
266	Осинник черничный свежий Bilberry aspen	94,7	–	100	88,0	94,5	93,0
		98,2		100	89,8	91,9	93,1
284	Осинник черничный влажный Bilberry moist aspen	97,5	100	100	96,0	96,7	96,9
		98,2	100	100	97,8	98,3	98,2

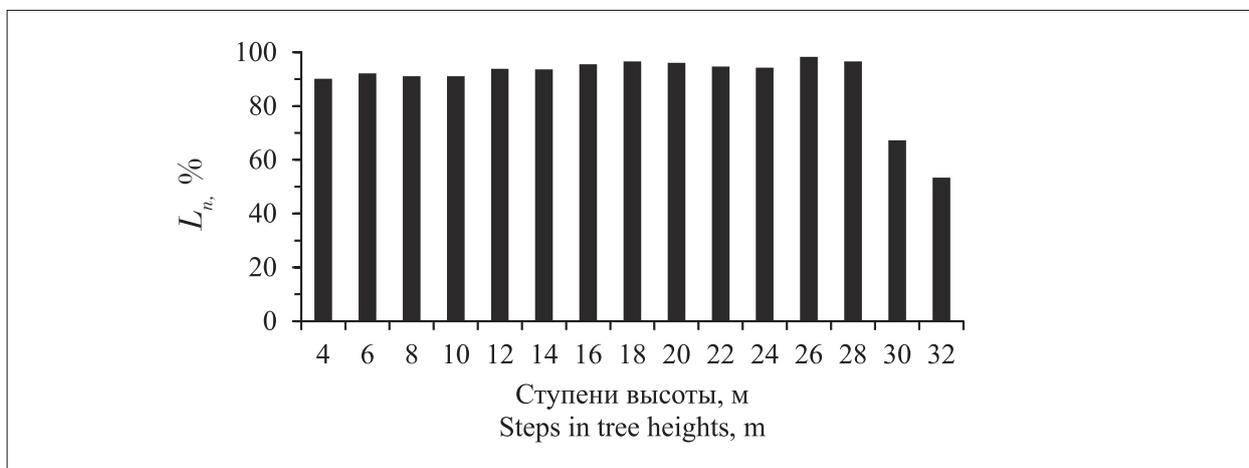
Примечание. В числителе – на основе количества деревьев, в знаменателе – на основе объёма ствола.  
Note. Numerator based on number of trees, denominator – on trunk volume.

Таблица 3 / Table 3

Статистические показатели средневзвешенных оценок жизненного состояния (L, %) хвойных и мелколиственных древостоев / Statistical indices of weighted average life condition assessments (L, %) of coniferous and small-leaved stands

Статистические показатели Statistical parameters	Ельники Spruce forests		Сосняки Pine forests		Лиственные Deciduous forests		Всего Total	
	$L_n$	$L_v$	$L_n$	$L_v$	$L_n$	$L_v$	$L_n$	$L_v$
Размер выборки, шт. / Sample size, pcs.	16	16	9	9	4	4	29	29
Среднее / Mean	93,7	93,9	93,9	96,6	93,7	96,1	93,7	95,1
Стандартная ошибка / Standard error	0,9	1,0	0,6	0,7	1,2	1,1	0,5	0,7
Медиана / Median	94,3	95,0	93,3	96,5	93,5	96,5	94,2	96,0
Мода / Moda	94,3	95,0	–	–	–	–	94,7	95,0
Стандартное отклонение Standard deviation	3,4	4,1	1,8	2,0	2,5	2,2	2,8	3,5
Дисперсия выборки / Sample variance	11,6	17,0	3,4	4,0	6,0	5,0	7,8	12,5
Экссесс / Excess	2,6	4,7	0	1,5	1,1	–0,4	3,2	6,7
Асимметрия / Asymmetry	–1,5	–1,9	0,9	–0,9	0,6	–0,8	–1,3	–2,2
Минимум / Minimum	84,4	81,6	92,1	92,5	91,0	93,1	84,4	81,6
Максимум / Maximum	97,2	98,7	97,4	99,4	96,9	98,2	97,4	99,4
Коэффициент вариации Coefficient of variation	3,6	4,4	2,0	2,1	2,6	2,3	3,0	3,7

Примечание: прочерк – отсутствие моды в выборочном ряду.  
Note: dash means no moda in the sample



**Рис. 2.** Распределение деревьев с разным жизненным состоянием по ступеням высоты в насаждениях тестового полигона «Ляльский»  
**Fig. 2.** Distribution of trees with different life state by height stages in stands of the test site “Lyalsky”

## Заключение

Исследования показали, что лесные экосистемы на тестовом полигоне «Ляльский» находятся в удовлетворительном состоянии. В насаждениях формируются смешанные по составу, средне- и низкобонитетные, разновозрастные древостои, представляющие различные типы растительных сообществ с разной степенью почвенного увлажнения. Большинство обследованных древостоев на постоянных пробных площадях характеризуются как здоровые, с высокими показателями жизнестойкости (84–97% по количеству деревьев и 81–99% по объёму древесины). Ослабленные деревья характерны для лиственных пород преимущественно в хвойных типах насаждений. Полученные результаты будут использованы для сопоставления данных о жизненном состоянии деревьев с оценками запасов фитомассы и углерода в лесах на особо охраняемых природных территориях, а также послужат основой для долговременного мониторинга на ландшафтном уровне.

*Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).*

## Литература

1. Бобкова К.С., Манов А.В., Кулявин И.Н. Лесные экосистемы Печорского бассейна: оценка ресурсного потенциала и средообразующих функций // Научные основы устойчивого управления лесами: материалы II Всероссийской научной конференции (с международным участием). М.: ЦЭП РАН, 2016. С. 8–10.
2. Жигунов А.В., Семакова Т.А., Шабунин Д.А. Массовое усыхание лесов на Северо-Западе России // Лесобиологические исследования на Северо-Западе таёжной зоны России: итоги и перспективы: материалы науч. конф., посвящённой 50-летию Института леса Карельского научного центра РАН. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 42–52.
3. Ярмишко В.Т., Игнатъева О.В. Сообщества *Pinus sylvestris* L. в техногенной среде на европейском севере России: структура, особенности роста, состояние // Сибирский лесной журнал. 2021. № 3. С. 44–55. doi: 10.15372/SJFS20210305
4. Цветков В.Ф. Лесной биогеоценоз. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. 268 с.
5. Громцев А.И. Основы ландшафтной экологии европейских таёжных лесов России. Петрозаводск: Карельский науч. центр РАН, 2008. 238 с.
6. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1989. № 4. С. 51–57.
7. Ритм углерода. О консорциуме. Цель и задачи [Электронный ресурс] <https://ritm-c.ru/about/goals-objectives/> (Дата обращения: 27.11.2023).
8. Лиханова И.А., Денева С.В., Холопов Ю.В., Рудь Е.А., Скребенков Е.А., Лаптева Е.М. Особенности лесных подстилок в разных типах среднетаёжных лесов // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 2. С. 72–81. doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-072-081

9. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа; ДиК, 1997. 116 с.

10. Методика полевых работ по таксации леса на постоянных пробных площадях в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Углерод в экосистемах: мониторинг» [Электронный ресурс] [https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/09/metodika-polevyh-rabot-po-taksaczii-na-ppp\\_27\\_06\\_2023-.pdf](https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/09/metodika-polevyh-rabot-po-taksaczii-na-ppp_27_06_2023-.pdf) (Дата обращения: 27.11.2023).

11. Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение / Под ред. В.А. Алексеева. Л.: Наука, 1990. 200 с.

12. Бебия С.М. Дифференциация деревьев в лесу, их классификация и определение жизненного состояния деревьев // Лесоведение. 2000. № 4. С. 35–43.

13. Манов А.В., Кутявин И.Н. Динамика структуры и состояния древесного яруса среднетаёжных коренных ельников предгорий Северного Урала // Лесоведение. 2023. № 6. С. 587–595. doi: 10.31857/S0024114823050054

14. Кутявин И.Н., Манов А.В., Осипов А.Ф., Бобкова К.С. Долговременная динамика состава, строения и состояния древостоев северотаёжных сосняков на европейском северо-востоке России // Сибирский лесной журнал. 2023. № 2. С. 17–25. doi: 10.15372/SJFS20230202

15. Осипов А.Ф., Манов А.В., Кузнецов М.А., Гуляев Р.Г., Загирова С.В. Запасы углерода крупных древесных остатков в лесных экосистемах тестового полигона «Ляльский» (средняя тайга, Республика Коми) // Вопросы лесной науки. 2024. Т. 7. № 1. Статья № 143. doi: 10.31509/2658-607x-202371-143

## References

1. Bobkova K.S., Manov A.V., Kutyavin I.N. Forest ecosystems of the Pechora Basin: assessment of resource potential and environment-forming functions // Scientific foundations of sustainable forest management: materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiem). Moscow: CEPL RAN, 2016. P. 8–10 (in Russian).

2. Zhigunov A.V., Semakova T.A., Shabunin D.A. Mass desiccation of forests in the North-West of Russia // Forest biological research in the North-West of the taiga zone of Russia: results and prospects: materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta lesa Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Petrozavodsk: KarSC RAS, 2007. P. 42–52 (in Russian).

3. Yarmishko V.T., Ignat'eva O.V. Communities of *Pinus sylvestris* L. in the technogenic environment in the

European north of Russia: structure, features of growth, condition // Sibirskij Lesnoj Zhurnal. 2021. No. 3. P. 44–55 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20210305

4. Tsvetkov V.F. Forest biogeocenosis. Arkhangelsk: Publishing house of the Arkhangelsk State Technical University. 2004. 268 p. (in Russian).

5. Gromtsev A.I. Fundamentals of landscape ecology of European taiga forests of Russia. Petrozavodsk: Karelian Scientific Centre RAS, 2008. 238 p. (in Russian).

6. Alekseev V.A. Diagnostics of tree vitality and stand condition // Lesovedenie. 1989. No. 4. P. 51–57 (in Russian).

7. Ritm Carbon. About consortium. Goal and objectives [Internet resource] <https://ritm-c.ru/about/goals-objectives/> (Accessed: 27.11.2023).

8. Likhanova I.A., Deneva S.V., Kholopov Yu.V., Rud E.A., Skrebenkov E.A., Lapteva E.M. Litter features in different forest types in the middle taiga subzone // Theoretical and Applied Ecology. 2024. No. 2. P. 72–81 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-2-072-081

9. Atlas of the Komi Republic on climate and hydrology. Moskva: Drofa; DiK, 1997. 116 p. (in Russian).

10. Methodology of field works on forest taxation on permanent sample plots within the framework of realization of the innovative project of state importance “Carbon in ecosystems: monitoring” [Internet resource] [https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/09/metodika-polevyh-rabot-po-taksaczii-na-ppp\\_27\\_06\\_2023-.pdf](https://ritm-c.ru/wp-content/uploads/2023/09/metodika-polevyh-rabot-po-taksaczii-na-ppp_27_06_2023-.pdf) (Accessed: 27.11.2023) (in Russian).

11. Forest ecosystems and air pollution / Ed. V.A. Alekseev. Leningrad: Nauka, 1990. 200 p. (in Russian).

12. Bebiya S.M. Differentiation of trees in forest, their classification and determination of life status // Lesovedenie. 2000. No. 4. P. 35–43 (in Russian).

13. Manov A.V., Kutyavin I.N. Tree storey structure and condition dynamics in middle-taiga native spruce forests of the northern Ural foothills // Lesovedenie. 2023. No. 6. P. 587–595 (in Russian). doi: 10.31857/S0024114823050054

14. Kutyavin I.N., Manov A.V., Osipov A.F., Bobkova K.S. Long-term dynamics of the composition, structure and state of tree stands of northern taiga pine forests in the European north-east of Russia // Sibirskij Lesnoj Zhurnal. 2023. No. 2. P. 17–25 (in Russian). doi: 10.15372/SJFS20230202

15. Osipov A.F., Manov A.V., Kuznetsov M.A., Gulyaev R.G., Zagirova S.V. Carbon stocks of coarse woody debris in forest ecosystems of the Lyalsky test site (middle taiga, Komi Republic) // Forest Science Issues. 2024. V. 7. No. 1. Article No. 143 (in Russian). doi: 10.31509/2658-607x-202371-143

## Экологическая эффективность экономики как основа устойчивого развития региона

© 2024. В. М. Караулов<sup>1</sup>, к. ф.-м. н., доцент, Л. В. Караулова<sup>2</sup>, к. п. н., доцент,  
В. Н. Пугач<sup>1</sup>, к. э. н., ректор, Е. В. Каранина<sup>1</sup>, д. э. н., зав. кафедрой,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>2</sup>Кировский государственный медицинский университет,  
610998, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,  
e-mail: Karanina@vyatsu.ru

В статье рассматриваются вопросы устойчивого развития регионов с позиции обеспечения экологической эффективности и экологического благополучия. Представлены подходы к исследованию взаимосвязи экономического роста и воздействия на окружающую среду. Предлагаются простые модели диагностики воздействия растущей экономики на окружающую среду, в том числе экологической эффективности региональной экономики. В основе авторской методики исследования лежит коэффициент экологической нагрузки, который рассчитывается как объём воздействия на окружающую среду на единицу валового регионального продукта, равного стоимостному эквиваленту фиксированного набора потребительских товаров и услуг. Показатель экологической эффективности строится на основе обратной величины коэффициента экологической нагрузки и отражает изменение экологичности экономики относительно базового периода. Исследование динамики экологической нагрузки даёт возможность проводить оценку экологической эффективности экономики, в том числе с позиций декарпинга.

В соответствии с авторской методикой в работе проводится диагностика экологической эффективности экономик регионов Приволжского федерального округа в 2010–2021 гг. на примере загрязнений атмосферного воздуха. В целом наблюдается повышение экологической эффективности и экологического благополучия, но ситуация среди субъектов неоднородная и различается по разным видам загрязнений и по регионам. В некоторых случаях наблюдается ухудшение экологических факторов. Более детально представлен анализ экологической эффективности по Кировской области. Установлено, что регион входит в тройку лидеров антирейтинга экологической эффективности экономик субъектов Приволжского федерального округа относительно выбросов в атмосферный воздух твёрдых веществ, оксида азота и оксида углерода. В целом делается вывод о низкой экологической эффективности экономики Кировской области.

**Ключевые слова:** экономический рост, устойчивое развитие, декарпинг, экологическое благополучие, эко-эффективность, экологическая эффективность экономики.

## Eco-efficiency as the basis for sustainability development of the region

© 2024. V. M. Karaulov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9599-3740<sup>1</sup>, L. V. Karaulova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-4618-8443<sup>2</sup>,  
V. N. Pugach<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-1220-4062<sup>1</sup>, E. V. Karanina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5439-5912<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vyatka State University,  
36, Moscovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Kirov State Medical University,  
112, Karl Marx St., Kirov, Russia, 610998,  
e-mail: Karanina@vyatsu.ru

The article examines issues of sustainable development of regions from the perspective of ensuring environmental efficiency and environmental well-being. Approaches to studying the relationship between economic growth and environmental impact are presented. Simple models for diagnosing the impact of a growing economy on the environment, including the environmental efficiency of the regional economy, are proposed. The author's research methodology is based on the environmental load coefficient, which is calculated as the volume of impact on the environment per unit of gross regional product equal to the value equivalent of a fixed set of consumer goods and services. The environmental efficiency indicator is based on the inverse of the environmental load coefficient and reflects changes in the environmental friendliness of the economy relative to the base period. Studying the dynamics of environmental load makes it possible to assess the environmental efficiency of the economy, including from the standpoint of decaplin.

Using the author's methodology, the work diagnoses the environmental efficiency of the economies of the regions of the Volga Federal District in 2010–2021 using the example of air pollution. In general, there is an increase in environmental efficiency and environmental well-being, but the situation among the subjects is heterogeneous and varies by different types of pollution and by region. In some cases, environmental factors have deteriorated. An analysis of environmental efficiency for the Kirov region is presented in more detail. It has been established that the region is one of the three leaders in the anti-rating of environmental efficiency of the economies of the constituent entities of the Volga Federal District regarding emissions of solid substances, nitrogen oxide and carbon monoxide into the atmospheric air. In general, a conclusion is made about the low environmental efficiency of the economy of the Kirov region.

**Keywords:** economic growth, sustainable development, decoupling, environmental well-being, eco-efficiency, environmental efficiency of the economy.

Традиционно для оценки состояния национальной экономики и её развития используют показатели валового внутреннего продукта (ВВП): ВВП на душу населения, доходы населения и индексы их роста. Согласно научным исследованиям, с позиций устойчивого развития выделяют три составляющие: сбалансированный самоподдерживающийся экономический рост, гармоничное социальное развитие и формирование благоприятной окружающей среды (ОС) при сохранении экосистем и биоразнообразия [1]. Актуальность данных принципов подтверждается тем, что они отражены странами ООН в 2015 г. в глобальных целях устойчивого развития до 2030 г. [2]. Важность экологической повестки также выражается в том, что в последнее время в качестве одной из составляющих безопасности стали использовать эколого-экономическую безопасность [3]. Для её исследования предполагается рассмотрение региональных техногенных и природных экосистем (ЭС) в комплексе. Региональная естественная ЭС может быть: природной ЭС, не испытывающей техногенной нагрузки, и техногенной. Возникает задача осуществления сбалансированного функционирования региональной ЭС с сохранением естественного биологического разнообразия и экологического равновесия – устойчивого и долгосрочного функционирования природных ЭС, находящихся на той же территории [4].

Влиянию экономического развития на состояние ОС в мировой практике уделяется много внимания, в частности, с конца XX века развивается экологическая экономика, в рамках которой разрабатываются модели взаимодействия эколого-экономических систем, например, с помощью специальных функций загрязнения ОС. Данные модели достаточно громоздки и сложны для анализа. Другое направление исследования связано с разработкой относительно простых моделей IPAT и STIRPAT, понятных и имеющих определённый экологический и экономиче-

ский смысл, расчёты по которым за ретроспективный период позволяют делать разумные выводы и способны привести к относительно небольшому количеству альтернативных управленческих решений [5].

Модели STIRPAT позволили исследовать различные факторы, влияющие на динамику загрязнения ОС. На основе анализа данных была сформирована гипотеза, что с ростом ВВП объём загрязнений увеличивается до определённого уровня и в дальнейшем снижается под воздействием структурных сдвигов и модернизации экономики. Данная зависимость описывается экологической кривой Кузнецца, которая представляет перевёрнутую U-образную кривую [6, 7]. Построение такой кривой для исследования зависимости выбросов в ОС от роста ВВП обычно осуществляется по панельным данным на основе квадратичных и более сложных функций [8]. Эта модель позволяет выявить экологичность экономического развития – эффект декаплинга, который проявляется в форме более низких темпов потребления ресурсов или загрязнения ОС относительно темпов роста экономики. Для количественной оценки эффекта декаплинга в конкретный период может использоваться формула [9]:

$$D_t = 1 - \frac{EP_t}{DF_t} / \frac{EP_{t-1}}{DF_{t-1}}, \quad (1)$$

где  $EP$  – показатель, отражающий негативное воздействие на ОС;  $DF$  – показатель, отражающий развитие экономики (ВВП, объём производства и др.);  $t$  – исследуемый период (год);  $(t-1)$  – предыдущий период.

Вариации данного инструмента для измерения количественной и качественной взаимосвязи между экономическим ростом, использованием ресурсов и загрязнением ОС различают декаплинг, каплинг, негативный декаплинг и степень антропогенного воздействия на ОС в зависимости от величины индекса декаплинга и направлений экономического роста [10–12].

Данные инструменты могут использоваться для исследования эколого-экономических взаимосвязей и на региональном уровне [13–17].

Таким образом, обеспечение устойчивого развития предполагает наличие качественного роста – повышение экологической эффективности. В данном контексте в исследованиях деятельности энергетических компаний, а также компаний нефтегазового сектора может встречаться термин «экоэффективность». Это понятие используется при оценке отношения экономической стоимости произведённого и воздействием на ОС при производстве определённого продукта или услуги. Такой показатель получил признание, так как его мониторинг способствует росту ответственности компаний за благополучие ОС. Требования экоэффективности оказывают влияние на формирование систем экологического менеджмента, в том числе сертифицирования, что сказывается на имидже компаний и возможности выхода на мировые рынки [18].

Концепция экологической эффективности также рассматривается и на региональном уровне. Экологически эффективным считается регион, который в сравнении с другими обеспечивает выпуск при минимальном объёме используемых ресурсов и минимальном загрязнении [1]. В этой работе авторы на основе анализа динамики экологической эффективности среднего российского региона и динамики экономического роста выделяют четыре модели развития регионов и факторы устойчивого регионального развития.

В качестве критерия эколого-экономической эффективности в [19] рассматривается отношение выбросов в атмосферу к валовому региональному продукту (ВРП) и на его основе проводится анализ эколого-экономической эффективности природно-социально-производственных систем регионов Приволжского федерального округа (ПФО).

В работе [20] экологическая эффективность оценивается на основе индексов экологического благополучия на единицу выпуска конечного продукта региональной экономики, т. е. воздействия на ОС при пересчёте на выпуск в объёме стоимостного эквивалента одного фиксированного набора потребительских товаров и услуг (ФНПТУ) в регионе, что соответствует концепции экоэффективности в работе [18]. Устанавливается, что индекс общего экологического благополучия зависит от общей экологической эффективности и динамики масштаба экономики – для сохра-

нения общего экологического благополучия (не возрастающего негативного воздействия на ОС) в условиях экономического роста уровень экологической эффективности должен увеличиваться более высокими темпами, чем экономика. Кроме того, устанавливается связь между экологической эффективностью и декарпингом, которая позволяет проводить оценку декарпинга экологического фактора с помощью показателя экологической нагрузки или показателя экологической эффективности.

Отметим, что взаимосвязь состояния ОС и социально-экономического развития (показатели экологической эффективности) ежегодно представляется в федеральных и региональных докладах о состоянии ОС [3, 21, 22]. С учётом рекомендаций Европейской экономической комиссии ООН рассматриваются такие экологические показатели, как выбросы парниковых газов в разбивке по видам деятельности, на душу населения, на единицу ВВП, структура и тенденции выбросов [21]. В том числе представлены сведения о природных и антропогенных факторах, влияющих на состояние ОС, а также о мерах по снижению таких воздействий. В качестве сравнительного анализа экологической эффективности регионов приведено их ранжирование по различным экологическим показателям в расчёте на душу населения.

Цель исследования – на примере загрязнений атмосферного воздуха провести анализ экологической нагрузки и экологической эффективности региональных экономик ПФО в 2010–2021 гг. как основы устойчивого развития с использованием авторской методики, которая учитывает уровень и динамику загрязнения ОС на единицу выпуска ВРП, равного стоимостному эквиваленту ФНПТУ в исследуемом регионе (в дальнейшем используется термин «на единицу выпуска» или «удельное загрязнение»).

### Объекты и методы исследования

В качестве факторов негативного воздействия на ОС рассматриваются выбросы в целом (отходящих от стационарных и передвижных источников) и в разрезе наиболее распространённых загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников.

Для проведения исследования использовались данные Росстата за 2010–2021 гг. по субъектам ПФО, а также в целом по России. В качестве инструментов применялись индексные и факторные методы, корреляционно-

регрессионный и другие виды анализа, а также инструменты, разработанные в предыдущих исследованиях – индекс снижения техногенного воздействия или индекс экологического благополучия [4], абсолютный показатель экологической нагрузки [17] и показатель экологической эффективности [20].

Для анализа взаимосвязи между экономическим развитием региона и воздействием на ОС использовались следующие показатели и индикаторы:

$X_i(t)$  – объём загрязняющих веществ  $i$ -го вида в период (год)  $t$ , тыс. т;

$Q(t)$  – ВРП исследуемого региона (в текущих ценах), млн руб.;

$P(t)$  – стоимость ФНПТУ в исследуемом регионе в период  $t$ , руб.;

$q(t) = \frac{Q(t)}{P(t)}$  – ВРП региона, выраженный через стоимостной эквивалент числа ФНПТУ, ед.;

$x_i(t) = \frac{X_i(t)}{q(t)}$  – объём выбросов загрязняющих веществ  $i$ -го вида на единичный выпуск [20], т. е. при выпуске ВРП в размере 1 ФНПТУ, кг. По сути,  $x_i(t)$  является удельным показателем экологической нагрузки по загрязнению  $i$ -го вида.

Показатель изменения экологической нагрузки позволяет просто оценивать декаплинг в период (год)  $t$ , связанный с  $i$ -го вида загрязнениями ОС [17]:

$$D_i(t) = 1 - \frac{x(t)}{x_i(t-1)}. \quad (2)$$

Напомним, что относительно  $i$ -го экологического фактора проявляется эффект декаплинга, если  $D_i(t) > 0$ .

Формула (2) позволяет осуществлять простую оценку экологической эффективности развития в текущем периоде, но, как было показано в [17], внешние шоки могут существенно влиять на проявление эффекта декаплинга. Поэтому в таких условиях становится актуальным обеспечение экологической эффективности в длительном периоде. Заметим, что долгосрочную оценку среднегодового декаплинга в таком случае можно получить на основе экспоненциального тренда  $\hat{x}_i(t) = a_i \cdot e^{b_i t}$  временного ряда показателей экологической нагрузки  $x_i(t)$  загрязнений  $i$ -го вида –  $D_i = -b_i$ , а также на основе коэффициента детерминации  $R^2$  тренда можно оценить устойчивость полученной среднегодовой оценки  $D_i$ .

Показатели экологической эффективности и экологического благополучия отражают качество экономического развития с позиций негативного воздействия на ОС по сравнению с базовыми показателями. В качестве базовых, как в работах [4, 17, 20], используются средние значения за базовый период 2010–2014 гг.:

$$X_i(0) = \frac{X_i(2010) + \dots + X_i(2014)}{5} \text{ – базовый}$$

уровень загрязнений  $i$ -го вида, тыс. т;

$$q(0) = \frac{q(2010) + \dots + q(2014)}{5} \text{ – базовый}$$

уровень ВРП в единицах ФНПТУ;

$x_i(0) = \frac{X_i(0)}{q(0)}$  – базовый уровень загрязнений  $i$ -го вида в расчёте на единицу выпуска (экологической нагрузки).

На основе базовых и текущих показателей определяются базисные индексы воздействия на ОС, а также индикаторы экологического благополучия и экологической эффективности [17]:

$$Y_i(t) = \frac{X_i(t)}{X_i(0)} \text{ – базисный индекс уровня}$$

загрязнений  $i$ -го вида в период  $t$ ;

$$y_i(0) = \frac{x_i(t)}{x_i(0)} \text{ – базисный индекс экологи}$$

ческой нагрузки – уровня загрязнений  $i$ -го вида в период  $t$  в расчёте на единицу выпуска;

$$Z_i(t) = \frac{100}{Y_i(t)} = \frac{100X_i(0)}{X_i(t)} \text{ – уровень экологи}$$

ческого благополучия в период  $t$  относительно  $i$ -го вида загрязнений по сравнению с базовым периодом;

$$z_i(t) = \frac{100}{y_i(t)} = \frac{100x_i(0)}{x_i(t)} \text{ – уровень экологи}$$

ческой эффективности региональной экономики в период  $t$  относительно  $i$ -го вида загрязнений, что соответствует показателю экологического благополучия на единицу выпуска конечной продукции, т. е. в объёме стоимости 1 ФНПТУ.

Заметим, что  $z_i(t) = Z_i(t) \cdot \frac{q(t)}{q(0)}$ , поэтому динамика экологического благополучия относительно  $i$ -го вида экологического фактора представляется через годовую динамику экологической эффективности и годовую динамику роста экономики, выраженную через ФНПТУ:

$$\frac{Z_i(t)}{Z_i(t-1)} = \frac{z_i(t)}{z_i(t-1)} / \frac{q(t)}{q(t-1)} = \frac{x_i(t-1)}{x_i(t)} / \frac{q(t)}{q(t-1)} \quad (3)$$

Формула (3) показывает, что для сохранения экологического благополучия фактора должна расти его экологическая эффективность темпами не меньше, чем рост ВРП, выраженный через ФНПТУ. Поэтому в качестве сбалансированного и устойчивого роста экономики можно рассматривать такую ситуацию, когда по важнейшим экологическим факторам наблюдается повышение экологической эффективности темпами не менее темпов всей экономики.

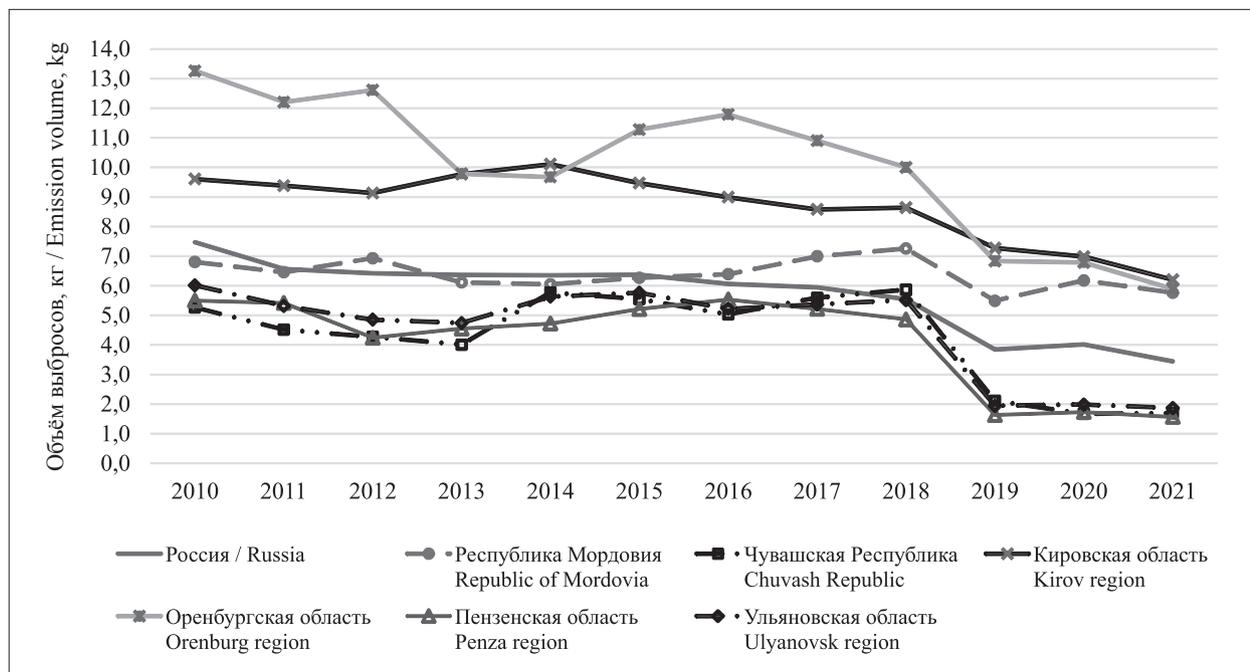
Таким образом, диагностика экологической эффективности может рассматриваться как один из инструментов обеспечения устойчивого развития.

### Результаты и обсуждение

**Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников.** Относительно всех выбросов

загрязняющих веществ в атмосферный воздух наибольшую экологическую нагрузку создаёт экономика Кировской области – в 2021 г. объём удельных выбросов в атмосферный воздух (при выпуске в объёме 1 ФНПТУ) составил 6,20 кг, далее идут Оренбургская область – 5,89 кг и Республика Мордовия – 5,76 кг. Наименьшую экологическую нагрузку (на единицу выпуска) в 2021 г. дают экономики Пензенской области – 1,57 кг, Чувашской Республики – 1,69 кг и Ульяновской области – 1,87 кг. Таким образом, разброс в экологической нагрузке на ОС экономик регионов в ПФО составляет почти четыре раза. Отчасти это объясняется отраслевой специализацией регионов. В целом по РФ данный показатель в 2021 г. составил 3,45 кг, а по ПФО – 3,33 кг. Динамика выбросов указанных субъектов в исследуемом периоде представлена на рисунке 1.

Исследование показателей экологической нагрузки в 2010–2021 гг. позволило оценить наличие долгосрочного положительного эффекта декарблинга. Наилучшие результаты среднегодового декарблинга за указанный период демонстрирует Пензенская область – 0,105 при  $R^2=0,550$ . Данный положительный эффект наблюдается при растущей экономике в среднем за год 2,31%, что выше среднего по-



**Рис. 1.** Удельный объём выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух  
Примечание к рисункам 1–3 и таблице 1: удельный объём выбросов рассматривается на единицу валового регионального продукта, стоимостная оценка которого равна фиксированному набору потребительских товаров и услуг в регионе

**Fig. 1.** Specific volume of emissions of pollutants into the atmosphere  
Note to Figures 1–3 and Table 1: the specific volume of emissions is considered per unit of gross regional product, the cost estimate of which is equal to a fixed set of consumer goods and services in the region

казателя по ПФО – 1,86%, но меньше чем по РФ – 2,66% (оценка роста экономик произведена на основе экспоненциальных трендов ВРП, выраженных в ФНПТУ, в частности для Пензенской области модель имеет вид:  $y = 7,5087e^{-0,105x}$ ).

В целом среднегодовой декаплинг по РФ относительно всех выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух составил 0,061 при  $R^2=0,792$ , а по ПФО – 0,054 при  $R^2=0,611$ . Все субъекты ПФО в исследуемом периоде показали положительное значение среднегодового декаплинга, при этом половина регионов имеет показатель выше среднего по округу. Кроме указанной выше Пензенской области сюда попадают (в порядке убывания положительного эффекта декаплинга) Ульяновская область (0,097), Самарская область (0,087), Чувашская Республика (0,086), Нижегородская область (0,077), Оренбургская область (0,063) и Пермский край (0,055).

Наиболее устойчивое проявление эффекта декаплинга среди указанных регионов – в Самарской ( $R^2=0,824$ ) и Оренбургской ( $R^2=0,713$ ) областях. В остальных регионах показатель устойчивости  $R^2 < 0,700$ .

Наибольшее сокращение выбросов загрязняющих веществ в ОС от стационарных и передвижных источников в 2021 г. по сравнению с 2010 г. произошло в Пензенской области (в 3,5 раза), Ульяновской области (в 3,2 раза), Чувашской Республике (в 3,1 раза) и Самарской области (в 3,1 раза). Наименьший рост экологической эффективности наблюдается в Республике Мордовия (сокращение выбросов на 18%), Республике Башкортостан (сокращение выбросов на 45%), Кировской области (сокращение выбросов на 55%) и Саратовской области (сокращение выбросов на 58%). В таблице 1 представлены показатели экологической нагрузки выбросов в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников в исследуемом периоде.

**Выбросы в атмосферный воздух от передвижных источников.** Структура удельных выбросов относительно стационарных и передвижных источников субъектов ПФО значительно различается и меняется в исследуемом периоде. В целом по РФ доля выбросов от передвижных источников с 40,8% в 2010 г. сокращается до 22,8% в 2021 г. По ПФО данные показатели выше – 50,0 и 30,2% соответственно. В трёх субъектах ПФО доля выбросов от передвижных источников в 2021 г. составила 50% и более – в Саратовской об-

ласти (55,5%), Республике Мордовия (51,8%) и Кировской области (50,0%). В четырёх субъектах доля не превышает 25% – в Оренбургской области (17,0%), Удмуртской Республике (20,0%), Республике Башкортостан (21,9%) и Самарской области (23,9%). В большинстве субъектов ПФО в 2014–2018 гг. наблюдался рост выбросов в атмосферный воздух от передвижных источников, но в 2019–2021 гг. происходило возвращение к тренду, наметившемуся в 2010–2013 гг. Это означает, что основной положительный эффект декаплинга относительно выбросов в атмосферный воздух от передвижных источников стал наблюдаться с 2019 г. Среднегодовой декаплинг за весь рассматриваемый период в целом по РФ составил 0,111, а по ПФО – 0,098. В половине регионов среднегодовой декаплинг превысил среднероссийский показатель (в порядке убывания положительного эффекта): в Пензенской области (0,161), Чувашской Республике (0,157), Самарской области (0,155), Ульяновской области (0,140), Удмуртской Республике (0,124), Республике Марий Эл (0,121) и Нижегородской области (0,113).

Наибольшие и наименьшие объёмы удельных выбросов в атмосферный воздух от передвижных источников в 2021 г. в субъектах ПФО представлены на рисунке 2.

Наибольшее сокращение удельных выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников в 2021 г. по сравнению с 2010 г. произошло в Пензенской области (в 6,6 раза), Самарской области (в 6,5 раз) и Чувашской Республике (6,4 раза). Наименьшие сокращения – в Республике Мордовия (в 1,5 раза) и Кировской области (1,6 раза). В остальных субъектах экологическая эффективность экономики повысилась более чем в два раза. В целом по РФ коэффициент экологической нагрузки сократился в 3,9 раза, а по ПФО – в 3,4 раза. Отметим, что по данным источника [21] в 2022 г. Кировская область показывает значительный объём выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников на душу населения среди 85 субъектов РФ – 4 позиция с показателем 0,080 т/чел., а Чувашская Республика – 82 позиция с показателем 0,012 т/чел.

**Выбросы наиболее распространённых загрязняющих атмосферу веществ.** По ПФО в целом в структуре удельных загрязнений от стационарных источников преобладают выбросы углеводородов и оксида углерода – на их долю приходится более 70% загрязнений (рис. 3).

Таблица 1 / Table 1

Экологическая нагрузка – объём удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, кг  
Environmental load – volume of specific emissions of pollutants into the atmosphere, kg

Субъекты / Subjects	Год / Year											
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Россия / Russia	7,47	6,57	6,42	6,36	6,35	6,37	6,06	5,95	5,54	3,84	4,01	3,45
Приволжский федеральный округ Volga Federal District	6,83	6,07	5,87	5,98	6,24	6,42	6,42	6,08	5,86	3,66	3,81	3,33
Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	7,09	6,24	5,28	6,29	7,98	8,24	8,48	7,69	7,26	4,91	5,16	4,87
Республика Марий Эл Republic of Mari El	7,80	6,59	5,95	5,22	6,01	5,58	6,97	6,85	6,94	3,77	5,38	3,97
Республика Мордовия Republic of Mordovia	6,80	6,46	6,93	6,11	6,05	6,27	6,39	6,99	7,26	5,49	6,18	5,76
Республика Татарстан Republic of Tatarstan	4,03	3,46	3,45	3,71	3,75	3,92	4,01	3,62	3,99	2,15	2,58	2,06
Удмуртская Республика Udmurt Republic	6,11	4,77	6,59	7,11	7,44	6,47	6,33	6,21	6,66	4,68	3,82	3,55
Чувашская Республика Chuvash Republic	5,26	4,52	4,27	4,01	5,77	5,55	5,03	5,59	5,87	2,11	1,67	1,69
Пермский край Perm region	7,86	6,50	6,43	7,53	6,98	7,10	7,21	7,00	6,41	4,01	4,42	3,77
Кировская область Kirov region	9,61	9,38	9,13	9,77	10,11	9,47	8,99	8,58	8,64	7,27	6,98	6,20
Нижегородская область Nizhny Novgorod Region	5,09	5,33	4,78	5,17	4,76	4,95	4,90	4,76	4,24	2,53	2,32	2,20
Оренбургская область Orenburg region	13,26	12,20	12,61	9,78	9,68	11,27	11,79	10,90	10,00	6,83	6,79	5,89
Пензенская область Penza region	5,50	5,42	4,24	4,55	4,72	5,22	5,53	5,22	4,86	1,63	1,73	1,57
Самарская область Samara Region	7,81	6,82	6,01	5,78	5,74	5,95	5,74	5,44	4,74	3,02	3,29	2,52
Саратовская область Saratov region	6,52	6,25	6,19	5,96	7,01	7,08	6,34	6,35	6,39	4,42	4,52	4,13
Ульяновская область Ulyanovsk region	6,01	5,32	4,85	4,74	5,63	5,76	5,22	5,37	5,52	1,94	1,98	1,87

Наименьшая доля таких загрязнений на единицу выпуска ВРП в 2021 г. фиксируется в Кировской области – 64,7%, а наибольшая – в Чувашской Республике – 80,7%. В целом по России на эти загрязнения приходится 60,0%.

Показатель удельных выбросов оксида углерода в целом по РФ в 2021 г. составил 0,82 кг, а по ПФО – 0,67 кг. Наиболее экологичными в ПФО по данному показателю являются Ульяновская область (0,17 кг), Чувашская Республика (0,21 кг) и Пензенская область (0,21 кг). Наибольшие выбросы в Оренбургской области (2,17 кг), Удмуртской Республике (1,44 кг) и Кировской области (1,21 кг). В остальных субъектах показатели ниже среднероссий-

ского уровня. Наибольший среднегодовой декаплинг в исследуемом периоде в Пермском крае (0,086), Чувашской Республике (0,067), Оренбургской области (0,066). В двух субъектах наблюдается отрицательный эффект декаплинга – в Республике Мордовия (-0,002) и Саратовской области (-0,108). В среднем по РФ среднегодовой декаплинг составил 0,041, а по ПФО – 0,037. Сокращение удельных выбросов оксида углерода по РФ составило 57%, а по ПФО – 47%. Среди субъектов ПФО наибольший рост экологической эффективности показали Пермский край (сокращение удельных выбросов в 2,3 раза) и Оренбургская область (в 2,1 раза). Снижение экологической

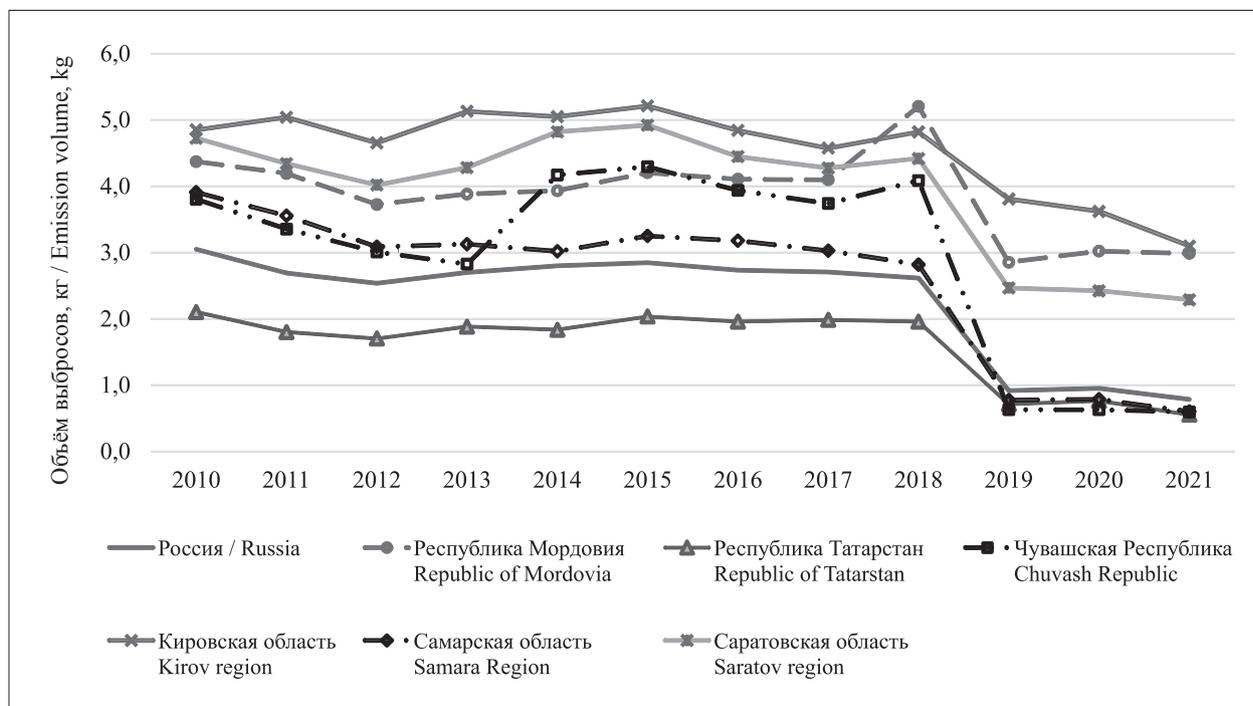


Рис. 2. Объём удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников  
 Fig. 2. Volume of specific emissions of pollutants into the atmosphere from mobile sources



Рис. 3. Структура удельных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников в ПФО  
 Fig. 3. Structure of specific emissions of pollutants into the atmosphere from stationary sources in the Volga Federal District

эффективности произошло в Удмуртской Республике (прирост экологической нагрузки на 48%), Саратовской области (47%), Республике Марий Эл (19%) и Пензенской области (11%), но объём удельных выбросов в последнем регионе совсем незначительный (рис. 4).

Показатель удельных выбросов в атмосферный воздух углеводородов в целом по РФ в 2021 г. составил 0,76 кг, а по ПФО – 0,99 кг. Наибольший объём выбросов в Республике Башкортостан (2,02 кг), Пермском крае (1,53 кг), Республике Марий Эл (1,50 кг), Республике Мордовии (1,41 кг) и Оренбургской области

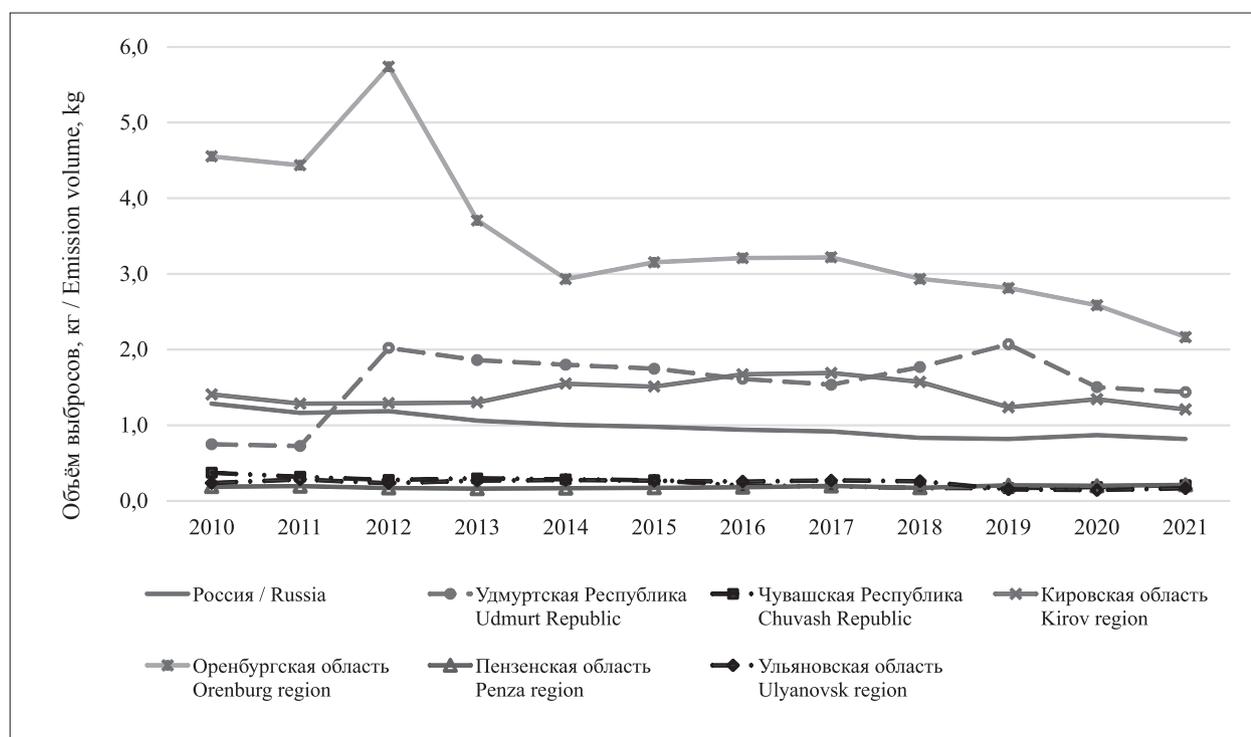
(1,17 кг). Наилучшая экологическая эффективность в Пензенской (0,39 кг), Нижегородской (0,42 кг) и Ульяновской областях (0,57 кг). Среднегодовой декарбонизации выбросов углеводородов в РФ составил 0,020, по ПФО – 0,010. В пяти субъектах ПФО экологическая обстановка относительно выбросов углеводородов ухудшилась – среднегодовые показатели декарбонизации имеют отрицательные значения в Республике Марий Эл (-0,090), Чувашской Республике (-0,043), Республике Мордовия (-0,031), Республике Башкортостан (-0,021) и в Пензенской области (-0,013). Наибольшие улучшения произошли в Самарской области (0,044) и Удмуртской Республике (0,033). Наибольший рост экологической эффективности в 2021 г. по сравнению с 2010 г. относительно выбросов углеводородов произошёл в Самарской области (экологическая нагрузка снизилась в 2,1 раза), Нижегородской области (в 1,8 раза) и Удмуртской Республике (в 1,7 раза). Снижение экологической эффективности произошло в Республике Марий Эл – экологическая нагрузка выросла на 31%, Республике Мордовия на 23%, Кировской и Пензенской областях – на 14%. В целом по

РФ сокращение удельных выбросов произошло на 44%, а по ПФО – на 31%.

В таблице 2 представлены среднегодовые значения декарбонизации и уровень экологической нагрузки (объём удельных выбросов в атмосферный воздух экономики субъекта) относительно различных загрязняющих веществ в 2021 г.

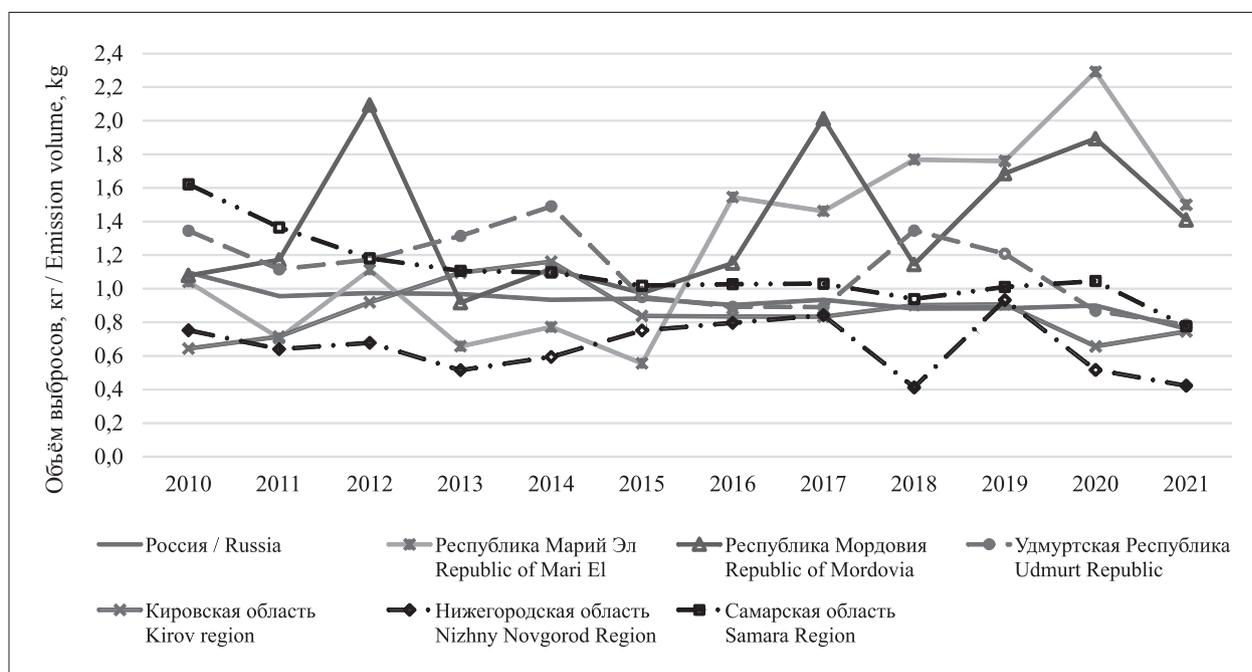
**Экологичность развития Кировской области.** В период 2010–2021 гг. экономика региона, согласно экспоненциальному тренду показателей ВРП в ФНПТУ, в среднем росла на 2,11% в год. Долгосрочное развитие по показателю коэффициента детерминации носит достаточно устойчивый характер –  $R^2=0,852$ , но эта характеристика не отражает сбалансированность развития, в частности, относительно воздействия на ОС. Поэтому был проведён сравнительный анализ изменений воздействия экономики Кировской области на ОС по сравнению с аналогичными показателями по ПФО и РФ в целом.

В Кировской области за исследуемый период произошёл рост экологической эффективности – сокращение удельных выбросов в атмосферный воздух, но по всем выбросам



**Рис. 4.** Объём удельных выбросов оксида углерода  
 Примечание: объём выбросов оксида углерода пересчитывается на единицу валового регионального продукта, стоимостная оценка которого равна фиксированному набору потребительских товаров и услуг в регионе

**Fig. 4.** Volume of specific emissions of carbon monoxide  
 Note: the volume of carbon monoxide emissions is recalculated per unit of gross regional product, the value of which is equal to a fixed set of consumer goods and services in the region



**Рис. 5.** Объём удельных выбросов углеводородов  
 Примечание: объём выбросов углеводородов пересчитывается на единицу валового регионального продукта, стоимостная оценка которого равна фиксированному набору потребительских товаров и услуг в регионе

**Fig. 5.** Volume of specific hydrocarbon emissions  
 Note: the volume of hydrocarbon emissions is recalculated per unit of gross regional product, the value of which is equal to a fixed set of consumer goods and services in the region

регион в целом уступает показателям округа. Рост экологической эффективности выбросов твёрдых веществ соответствует окружной динамике, а по снижению выбросов оксида азота ситуация лучше – произошло сокращение выбросов на 39,5% при 28,5% по округу. Наилучшие показатели роста экологической эффективности относительно выбросов диоксида серы – снижение экологической нагрузки произошло более чем в семь раз – с 0,82 до 0,11 кг при выпуске в объёме 1 ФНПТУ, тогда как по округу сокращение составило 52,5% – с 0,46 до 0,22 кг. Снижение экологической эффективности произошло только относительно выбросов углеводородов – рост удельных выбросов на 16,0%. Несмотря на снижение удельных выбросов оксида углерода на 14,1%, роста экологической эффективности оказалось недостаточно – из-за растущей экономики общий объём выбросов оксида углерода в атмосферный воздух увеличился на 18,8%. Снижение экологической эффективности относительно выбросов углеводородов на фоне растущей экономики привело к увеличению загрязнения ОС углеводородами на 55,1%. Тем не менее, в Кировской области за исследуемый период с учётом всех источников

произошло сокращение выбросов в атмосферный воздух – на 13,7%, что значительно меньше, чем в целом по ПФО (32,4%) и РФ (31,0%). Загрязнение от передвижных источников сократилось менее 15%, хотя по ПФО и РФ сокращение произошло более чем вдвое. Наилучшие результаты Кировской области по сокращению выбросов диоксида серы в ОС – более чем в пять раз – с 17,6 тыс. т в 2010 г. до 3,2 тыс. т в 2021 г. (табл. 3).

Таким образом, позитивная динамика роста экологичности производства в Кировской области уступает в целом динамике показателей ПФО. По пяти из семи показателей экологической эффективности Кировская область оказывается в тройке аутсайдеров по ПФО (табл. 3). Регион демонстрирует наихудшие показатели в округе по уровню снижения выбросов в атмосферный воздух от стационарных и передвижных источников. Анализ динамично снижающихся выбросов диоксида серы при единичном выпуске показывает, что достигнутый уровень загрязнений не является очень низким – 9 место в округе. А наилучшая – шестая позиция Кировской области в рейтинге субъектов ПФО достигается на фоне снижающейся эффективности – растущих удельных выбросов углеводородов

Таблица 2 / Table 2

Значение среднегодового декарпинга и экологической нагрузки в 2021 г., кг, в субъектах ПФО по различным видам загрязнения атмосферного воздуха  
The value of average annual decoupling and environmental load in 2021, kg, in the constituent entities of the Volga Federal District for various types of air pollution

Субъекты Subjects	Все источники All sources	Передвиж- ные источники Mobile sources	Выбросы от стационарных источников / Emissions from stationary sources				
			твёрдые вещества solid	диоксид серы sulfur dioxide	оксид азота nitrogen oxide	оксид углерода carbon monoxide	углево- дороды hydro- carbon
Россия Russia	0,061; 3,45	0,111; 0,79	0,067; 0,26	0,052; 0,50	0,028; 0,30	0,041; 0,82	0,020; 0,76
ПФО Volga Federal District	0,054; 3,33	0,098; 1,01	0,058; 0,13	0,043; 0,22	0,026; 0,28	0,037; 0,67	0,010; 0,99
Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	0,020; 4,87	0,087; 1,07	0,021; 0,18	-0,041; 0,43	0,005; 0,42	0,015; 0,72	-0,021; 2,02
Республика Марий Эл Republic of Mari El	0,036; 3,97	<b>0,121</b> ; 1,09	0,096; 0,21	0,044; 0,07	0,036; 0,32	0,026; 0,67	-0,090; 1,50
Республика Мордовия Republic of Mordovia	0,009; 5,76	0,026; 2,99	0,050; 0,17	0,078; 0,01	0,004; 0,66	-0,002; 0,42	-0,031; 1,41
Республика Татарстан Republic of Tatarstan	0,046; 2,06	0,098; 0,56	0,040; 0,06	-0,039; 0,16	0,017; 0,20	0,029; 0,33	0,010; 0,74
Удмуртская Республика Udmurt Republic	0,039; 3,55	<b>0,124</b> ; 0,71	-0,018; 0,24	0,028; 0,08	0,034; 0,28	0,046; 1,44	0,033; 0,79
Чувашская Республика Chuvash Republic	0,086; 1,69	<b>0,157</b> ; 0,60	0,011; 0,07	0,073; 0,01	0,070; 0,13	0,067; 0,21	-0,043; 0,66
Пермский край Perm region	0,055; 3,77	0,085; 1,01	0,051; 0,14	0,024; 0,09	0,045; 0,38	0,086; 0,59	0,017; 1,53
Кировская область Kirov region	0,036; 6,20	0,035; 3,10	0,051; 0,57	<b>0,189</b> ; 0,11	0,045; 0,38	0,001; 1,21	0,004; 0,75
Нижегородская область Nizhny Novgorod Region	0,077; 2,20	<b>0,113</b> ; 1,05	0,061; 0,08	<b>0,148</b> ; 0,06	0,048; 0,26	0,012; 0,33	0,021; 0,42
Оренбургская область Orenburg region	0,063; 5,89	0,091; 1,00	0,091; 0,22	0,059; 0,94	0,027; 0,37	0,066; 2,17	0,019; 1,17
Пензенская область Penza region	<b>0,105</b> ; 1,57	<b>0,161</b> ; 0,69	0,048; 0,07	<b>0,227</b> ; 0,02	0,040; 0,14	0,013; 0,21	-0,013; 0,39
Самарская область Samara Region	0,087; 2,52	<b>0,155</b> ; 0,60	0,091; 0,10	<b>0,102</b> ; 0,17	0,029; 0,22	0,039; 0,62	0,044; 0,78
Саратовская область Saratov region	0,036; 4,13	0,059; 2,29	0,065; 0,10	0,014; 0,13	-0,021; 0,26	-0,108; 0,41	0,023; 0,92
Ульяновская область Ulyanovsk region	0,097; 1,87	<b>0,140</b> ; 0,81	0,089; 0,09	<b>0,136</b> ; 0,03	0,012; 0,17	0,046; 0,17	0,024; 0,57

Примечание: первый показатель – среднегодовое значение декарпинга за 2010–2021 гг., жирным шрифтом выделены значения с повышенным эффектом декарпинга (более 0,100); второй показатель – коэффициент экологической нагрузки – объём выбросов загрязняющих веществ на единицу выпуска экономики, т. е. при производстве конечного продукта, стоимостная оценка которого равна фиксированному потребительскому набору товаров и услуг в регионе.

Note: the first indicator is the average annual decoupling value for 2010–2021, values with an increased decoupling effect (more than 0.100) are highlighted in bold; the second indicator is the environmental load coefficient – the volume of pollutant emissions per unit of economic output, i.e. in the production of a final product, the value of which is equal to a fixed consumer set of goods and services in the region.

Таблица 3 / Table 3

Влияние экономического развития Кировской области, ПФО и РФ на загрязнение атмосферного воздуха в 2010–2021 гг.  
The impact of economic development of the Kirov region, Volga Federal District and the Russian Federation on air pollution in 2010–2021

Субъекты Subjects	Все источники All sources	Передвижные источники Mobile sources	Выбросы от стационарных источников Emissions from stationary sources				
			твёрдых веществ solid	диоксида серы sulfur dioxide	оксида азота nitrogen oxide	оксида углерода carbon monoxide	углеводородов hydrocarbon
Динамика выбросов, 2021/2010, кг/кг Emission dynamics, 2021/2010, kg/kg							
Россия / Russia	0,690	0,386	0,693	0,736	1,051	0,876	1,039
ПФО Volga Federal District	0,676	0,408	0,769	0,660	0,990	0,965	1,055
Кировская область Kirov region	0,863	0,854	0,749	0,182	0,809	1,188	1,551
Динамика удельных выбросов, 2021/2010, кг/кг Dynamics of specific emissions, 2021/2010, kg/kg							
Россия / Russia	0,462	0,258	0,463	0,492	0,703	0,636	0,695
ПФО Volga Federal District	0,488	0,295	0,555	0,477	0,715	0,680	0,762
Кировская область Kirov region	0,646	0,639	0,560	0,136	0,605	0,859	1,160
Объём удельных выбросов в 2021 г., кг Volume of specific emissions in 2021, kg							
Россия / Russia	3,45	0,79	0,26	0,50	0,30	0,82	0,76
ПФО Volga Federal District	3,33	1,01	0,13	0,22	0,28	0,67	0,99
Кировская область Kirov region	6,20	3,10	0,57	0,11	0,38	1,21	0,75
Место Кировской области в ПФО	14	14	14	9	12	12	6
Отношение выбросов Кировская область / ПФО	1,86	3,08	4,28	0,51	1,35	1,79	0,75

(отметим, что в 2020 г. ТЭЦ были переведены с торфа и угля на газ). Это позволяет утверждать о низкой экологической эффективности экономики Кировской области. Данный вывод в целом может говорить о преобладании в экономике достаточно устаревшего оборудования, что является препятствием к повышению экологической эффективности. Экономический рост в этих условиях приведёт к увеличению антропогенного воздействия на ОС, что в дальнейшем может негативно сказаться на развитии социальной сферы, в частности, на условиях проживания в регионе. Данные выводы подтверждаются Национальным экологическим рейтингом – по итогам 2022 г. и зимы 2023 гг. Кировская область занимала 54 место, а в период зима-весна 2024 г. уже 57 место [23].

### Заключение

Экологическое благополучие предполагает сокращение антропогенного воздействия на ОС. На фоне растущей экономики это возможно только при повышении экологической эффективности темпами, превышающими экономический рост. Поэтому устойчивое экономическое развитие должно сопровождаться соответствующим повышением экологической эффективности экономики. Для диагностики экологичности экономики может быть использован показатель экологической эффективности, обратный показателю антропогенного воздействия экологического фактора – коэффициента экологической нагрузки. Для межрегиональных сопоставлений данные показатели рассчитываются на единицу выпуска экономики, т. е.

выпуск в объёме, стоимостная оценка которого соответствует цене фиксированного набора потребительских товаров и услуг в регионе. Относительное сокращение экологической нагрузки является коэффициентом декарпинга, характеризующим положительный эффект воздействия экономического роста на ОС. Для исследования декарпинга в долгосрочном периоде можно использовать среднегодовое значение декарпинга на основе экспоненциального тренда коэффициента экологической нагрузки.

Часто экологическую эффективность оценивают на основе показателей воздействия на ОС с учётом различных факторов: с учётом площади и плотности населения; по объёму выбросов загрязняющих веществ от передвижных и стационарных источников; по валовому выпуску продукции (масштабу всей экономики); относительно динамики загрязнения; с учётом специфики и структуры экономики регионов и т. д. Рейтинги регионов по данным показателям могут значительно различаться, поэтому при оценке экологического благополучия населения нужен комплексный подход с учётом различных факторов.

Результаты исследования экологической эффективности экономик регионов ПФО на примере выбросов в атмосферный воздух показали в целом повышение экологического благополучия – снижения выбросов на фоне растущих экономик. Но ситуация в регионах неоднородная как с позиций достигнутого уровня техногенного воздействия, так и динамики его снижения. Увеличение экологической эффективности не всегда обеспечивает сохранение экологического благополучия в регионах на фоне растущих экономик. Диагностика и сопоставление экологической нагрузки на ОС различных регионов позволяет в полной мере вскрыть проблемы с позиций обеспечения устойчивого и сбалансированного экономического развития.

*Статья подготовлена при поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ-5187.2022.2 для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации в рамках темы исследования «Разработка и обоснование концепции, комплексной модели резиллиент-диагностики рисков и угроз безопасности региональных экосистем и технологии ее применения на основе цифрового двойника».*

## References

1. Zemtsov S.P., Kidyaeva V.M., Barinova V.A., Lanshina T.A. Environmental efficiency and sustainable development of Russian regions over the twenty years of raw materials growth // *Economic Policy*. 2020. V. 15. No. 2. P. 18–47 (in Russian). doi: 10.18288/1994-5124-2020-2-18-47
2. UN. About the Sustainable Development Goals [Internet resource] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Accessed: 20.02.2024).
3. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moskva: Ministry of Natural Resources and Environment of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosova, 2021. 864 p. (in Russian).
4. Karanina E.V., Karaulov V.M., Kartavykh K.E. Conceptual approach to diagnosing the ecological and economic security of the region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 214–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-214-223
5. Druzhinin P.V., Shkiperova G.T., Potasheva O.V. Study of the relationship between environmental and economic indicators: modeling and analysis of calculations / Ed. P.V. Druzhinin. Petrozavodsk: Karelian Research Center RAS, 2019. 127 p. (in Russian).
6. Selden T., Song D. Environmental quality and development: is there a Kuznets curve for air pollution emissions? // *Journal of Environmental Economics and Management*. 1994. No. 27 (2). P. 147–162.
7. Panayotou T. Demystifying the environmental Kuznets curve: turning a black box into a policy tool // *Environment and Development Economics*. 1997. No. 2 (4). P. 465–484.
8. Auci S., Becchetti L. The instability of the adjusted and unadjusted environmental Kuznets curves // *Ecological Economics*. 2006. V. 60. P. 282–298.
9. Shkiperova G.T. Analysis and modeling of the relationship between economic growth and environmental quality (on the example of the Republic of Karelia) // *Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika*. 2014. No. 43 (394). P. 41–49 (in Russian).
10. Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 // *Transport Policy*. 2005. V. 12. P. 137–151.
11. Arsakhanova Z.A., Khazhmuradov Z.D., Khazhmuradova S.D. Decoupling in economics – essence, definition and types // *Obshchestvo, ekonomika, upravleniye*. 2019. V. 4. No. 4. P. 13–18 (in Russian).
12. Polyakov V.V. Decoupling as a mechanism for eliminating environmental and economic contradictions: essential content and features of assessment // *Ekonomika i ekologiya territorial'nykh obrazovaniy*. 2021. V. 5. No. 4. P. 37–43 (in Russian). doi: 10.23947/2413-1474-2021-5-4-37-43
13. Shkiperova G.T. Ecological Kuznets curve as a tool for studying regional development // *Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika*. 2013. No. 19 (322). P. 8–16 (in Russian).

14. Druzhinin P.V., Shkiperova G.T., Potasheva O.V. Features of the development of Russian regions and the ecological Kuznets curve // *Regional'naya ekonomika. Yug Rossii*. 2020. V. 8. No. 1. P. 155–167 (in Russian). doi: 10.15688/re.volsu.2020.1.14
15. Zabelina I.A., Delyuga A.V. Ecological and economic trends in the Baikal region and the Far East in the context of institutional changes // *EKO*. 2019. No. 5 (539). P. 66–88 (in Russian).
16. Shkiperova G.T., Kurilo A.E. Assessing the sustainability of regional socio-ecological-economic systems // *Problemy rynochnoy ekonomiki*. 2021. No. 1. P. 47–61. doi: 10.33051/2500-2325-2021-1-47-61
17. Karaulova L.V., Karaulov V.M. Statistical analysis of the influence of economic development on the environment and the state of the social sphere in the regions of the Volga Federal District // *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniya*. 2023. V. 3. No. 12 (141). P. 59–69 (in Russian). doi: 10.36871/ek.up.p.r.2023.12.03.007
18. Gorbunova O.I., Kanitskaya L.V. Development of methods for assessing eco-efficiency as the main requirement for the implementation of the principles of the “green economy” // *Issues of innovative economics*. 2019. V. 9. No. 2. P. 419–434 (in Russian). doi: 10.18334/vinec.9.2.40609
19. Karanina E.V., Pugach V.N., Kartavykh K.E. Analysis of the environmental and economic efficiency of the functioning of the regions of the Volga Federal District // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 225–234 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-225-234
20. Karaulova L.V., Karaulov V.M. Multifactorial model for assessing the environmental friendliness of regional economic development // *Ekonomika i upravleniye: problemy, resheniya*. 2024. V. 3. No. 2 (143). P. 41–53 (in Russian). doi: 10.36871/ek.up.p.r.2024.02.03.006
21. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2022. State report. Moskva: Ministry of Natural Resources and Environment of Russia; Moscow State University named after M.V. Lomonosova, 2023. 686 p. (in Russian).
22. Regional report “On the state of the environment of the Kirov region in 2022” [Internet resource] <https://priroda.kirovreg.ru/library/doklad-regionalnyy-ostoyanii-okruzhayushchey-sredy-kirovskoy-oblasti-v-2022-godu.html?ysclid=lxzx0wiyg40221589> (Accessed: 20.06.2024) (in Russian).
23. National environmental rating [Internet resource] <https://greenpatrol.ru/stranica-dlya-obshchego-reytinga> (Accessed: 20.06.2024) (in Russian).

## Food waste and its valorization into value-added products (case-study of the international experience of Asian countries)

© 2024. O. V. Baykova ORCID: 0000-0002-4859-8553

V. N. Pugach ORCID: 0000-0003-1220-4062

A. V. Kazakov ORCID: 0000-0001-5522-4624

Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

e-mail: olga-baykova@yandex.ru, kazakov.andrey.bonus@yandex.ru

With the changing lifestyle and rapid urbanization of the world's population, the amount of food waste from various industrial, agricultural and household sources is increasing. Food waste is rich in organic substances, so traditional approaches to its disposal in municipal solid waste landfills and incineration can lead to serious consequences for the environment and human health. The use of biological methods for the treatment of such waste offers a sustainable way to valorize them. Being rich in nutrients, food waste can serve as a substrate for the growth of microorganisms and the subsequent production of various value-added products. The article provides an overview of international research in the agricultural sector of India and China on the valorization of fermentation-based waste for the production of various value-added bioproducts. It should be noted that these countries were not chosen by chance, they are the leading countries in Southeast Asia in the field of recycling organic compounds with benefits for the economy and the environment. To achieve this goal, we have used a review and analytical method, which makes it possible to visually illustrate how, based on the use of valorization, food waste can be advantageously used as raw materials or resources for the production of new products, including biofuels, electricity, biosurfactants, etc.

As part of the ongoing work, data on case studies of the agricultural sector in India and China on successful repurposing of food waste for the production of new products is being further summarized.

**Keywords:** waste disposal, waste recycling, valorization, food waste, household waste, agricultural waste, India, China.

УДК 658.477

## Пищевые отходы и их валоризация в продукты с добавленной стоимостью (обзор международного опыта азиатских стран)

© 2024. О. В. Байкова, д. ф. н., зав. кафедрой,

В. Н. Пугач, к. э. н., ректор,

А. В. Казаков, к. ф. н., доцент,

Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

e-mail: olga-baykova@yandex.ru, kazakov.andrey.bonus@yandex.ru

С изменением образа жизни и быстрой урбанизацией населения планеты увеличивается количество пищевых отходов из различных промышленных, сельскохозяйственных и бытовых источников. Пищевые отходы богаты органическими веществами, поэтому традиционные подходы к их захоронению на полигонах твёрдых коммунальных отходов и сжиганию могут привести к серьёзным последствиям для окружающей среды и здоровья человека. Использование биологических методов для обработки таких отходов предлагает устойчивый способ их валоризации. Будучи богатыми питательными веществами, пищевые отходы могут служить субстратом для роста микроорганизмов и последующего производства различных продуктов с добавленной стоимостью. В статье представлен обзор международных исследований сельскохозяйственного сектора Индии и Китая по валоризации отходов на основе ферментации для производства различных биопродуктов с добавленной стоимостью. Необходимо отметить, что данные страны выбраны не случайно, они являются передовыми странами Юго-Восточной Азии в области утилизации органических соединений с пользой для экономики и окружающей среды. Для достижения поставленной цели нами задействован обзорно-аналитический метод, который даёт возможность наглядно проиллюстрировать, как на основе применения валоризации можно выгодно использовать пищевые отходы в качестве сырья или ресурсов для производства новых продуктов, в том числе биотоплива, электроэнергии, биосурфактантов и т. д.

В рамках проводимой в настоящее время работы обеспечивается дальнейшее обобщение данных о тематических исследованиях сельскохозяйственного сектора Индии и Китая, касающихся успешных мероприятий по перепрофилированию пищевых отходов для производства новых продуктов.

**Ключевые слова:** утилизация отходов, переработка отходов, валоризация, пищевые отходы, отходы домохозяйств, сельскохозяйственные отходы, Индия, Китай.

In recent years, the topic of food waste has increasingly attracted the attention of the world community. This is due to the fact that this environmental problem has a significant impact not only on the economy, social sphere and the environment, but also on world resources in general [1–5]. Daily nutrition is an important component for maintaining life. Living organisms at different evolutionary levels consume food in various forms, for example, microorganisms absorb food in the form of macromolecules such as carbohydrates, fats, nitrogenous compounds, while humans eat a complex version of food, that is, in the form of fruits, vegetables, cereals, legumes, meat and dairy products. The problem arises when food is wasted or misused, which leads to serious social, economic and environmental consequences [6].

Food products that have completely or partially lost their original consumer properties in the processes of their production, processing, use or storage are called food waste [6]. According to the definition formulated by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), food waste is “the loss of quality and quantity of food products during the chain of stages of production, processing and storage”. In particular, food waste is defined as losses at the end of the life cycle of food products [6]. Food losses are also defined as the unintentional loss or intentional elimination of food suitable for consumption [7]. According to [7–9], “food losses” are defined as losses during preparation and post-harvest processing, while “food waste” refers to losses at the stages of distribution and consumption.

According to FAO, the world generates 1.3 billion tons of food waste every year, which accounts for a third of the total amount of food produced worldwide, accounting for 28% of agricultural area, 1.4 billion hectares of fertile land [6, 10, 11]. It is predicted that economic growth and population growth in Asian countries will lead to an increase in food waste production in the next 25 years. It is also expected that by 2025 the volume of urban food waste will increase by 138 million tons compared, for example, with 2005 [6, 11]. Of the total waste generated in the world, Asia accounts for 278 million tons of food waste, while,

for example, Vietnam generates approximately 11.55 million tons of food waste [12]. These wastes, which include waste from households, the hotel sector, the food industry and agriculture, contain fresh fruits, vegetables, dairy products, bakery products and meat [10, 12].

Food waste is an element of municipal solid waste (MSW), which is disposed of by fermentation, composting, burial and incineration at MSW landfills [13]. When burning food waste with a high moisture content, dioxins and furans are formed, which affect human health [6]. At the same time, dumping food waste in an open area leads to environmental pollution problems. According to FAO estimates, more than 3.3 billion tons of CO<sub>2</sub> are generated annually as a result of the disposal of food waste, which contributes to the emission of greenhouse gases [11]. The valorization of food waste, which includes the process of converting waste into useful products, including chemicals, materials and fuels, is an ideal approach to improve environmental sustainability and overcome socio-economic problems in the world.

In the Russian Federation, namely in the Kirov region, the annual volume of waste generation is approximately 5 million tons, of which more than 2.5 million tons (50%) are livestock waste, about 2 million tons (40%) are industrial waste and 0.5 million tons (10%) are solid municipal waste [14].

As world practice shows, the secondary use of useful fractions of MSW is a source of raw materials for industrial production. One of the main conditions for using MSW as secondary resources is their centralized collection and extraction of useful fractions. The government of the Kirov region is ready to create joint ventures with China for processing low-grade wood, as well as enterprises for processing milk, including the production of products with a long shelf life. As for cooperation with India, the potential areas for joint activities today are mechanical engineering, chemical industry, agriculture. For a country with a population of more than a billion people, the problem of food shortages is quite acute. Back in 2008, the Kirov region, with the personal participation of the regional leadership, was ready to supply environmentally

friendly products of agricultural enterprises produced at joint ventures to India. To date, in the Kirov region there is a huge number of enterprises working in the sphere of agriculture, but the number of enterprises for processing agricultural products (especially deep processing) is extremely insufficient. Namely Uralchem Innovation has opened the first pilot plant in Russia for the production of pea protein, which is suitable for the production of alternative meat, milk and sports nutrition [15]. However, unlike other world producers – India, China – the Kirov region does not have technologies for deep processing of agricultural products.

In our work, we analyze case studies of the Indian food industry and the Chinese agricultural industry to illustrate how enterprises in highly developed Southeast Asian countries use food waste, expanding entrepreneurial initiative and creating value-added products. In our opinion, for the effective use of food waste, it is necessary that the food industry and agriculture of the Kirov region follow the example of Indian and Chinese agriculture, in particular, the use of entrepreneurial initiative in solving the problems of further valorization of food waste.

The presented review of international research on the problems of the emergence of food waste, as well as their processing into vital human resources, aims to identify the sources and nature of food waste that can be effectively converted into high-quality products with added value. The article examines in detail the sources of food waste generation in the food industry of India and the agricultural industry of China, as well as their valorization by introducing biomass containing bacteria into high-quality value-added products.

### Objects and methods of research

A review and analytical method have been used to achieve this goal. The selection of information for the study have been carried out by keywords in the bibliographic databases of scientific citation Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics). The search for sources took place in the Yandex and Google search engines. The review includes sources published from 1998 to the present. The information was searched in international interdisciplinary scientific peer-reviewed open access journals devoted to environmental and economic issues by keywords: waste disposal, waste recycling, valorization, food waste, kitchen waste, agricultural waste, India, China.

### Analytical review of international studies

**Waste from the Indian food industry and its valorization.** A significant proportion of the human diet in India consists of cereals such as wheat, rice, barley, corn, sorghum, millet, oats and rye [6]. According to FAO, the total global crop production in India, for example, reached 2577.85 million tons in 2016 [16, 17]. India, being the world's largest producer of grain legumes, produces a significant amount of husk during processing as a by-product [18], which is subsequently processed to produce high-quality products. For example, along with the use of straw, husks and dried leaves as animal feed, these products are traditionally used for the manufacture of roofing, baskets, brooms, hand fans and decorative products. The above-mentioned wastes are also used as cleaning and polishing agents in the metalworking and machine-building industries. Rice husk is used as a vegetable fiber for pet food, fertilizer and substrate for vermicomposting technology, as well as in the production of building materials, for example, light bricks [19, 20]. The husk obtained as a result of processing cocoa pods is used to extract pectin and produce vermicompost, oyster mushrooms, livestock feed and other value-added products [21]. In addition, coconut husks are used in the manufacture of household products such as ropes, brooms, mats, tiles, fishing nets and mattresses. By-products obtained in the process of barley purification serve as a rich source of bioactive compounds such as phytates, insoluble dietary fiber, phenolic compounds, which contain 2.7 times more vitamin E than in whole barley grain [16]. Rice husks are used in the fermentation process to regulate humidity, as well as to maintain the porosity of the fermenting material used for gas exchange during distillation [22].

Fruit and vegetable waste is generated at different stages of the food supply chain: production, processing, packaging, storage and transportation [23]. India is the second largest producer of vegetables and fruits in the world, accounting for 10 and 14% of global production [24]. The resulting waste is recycled by composting, burial, incineration or used as animal feed. These disposal methods cause serious environmental problems, such as emissions of toxic substances and greenhouse gases, as well as the proliferation of microbes due to the high moisture content and filtrate from landfills [23, 25].

Growing public concern about the preservation of the environment from pollution, as well

as socio-economic factors, have accelerated research in the field of food waste processing, namely in the search for more effective ways to use fruit and vegetable waste. Starch, cellulose and/or hemicellulose of fruit and vegetable waste are hydrolyzed to soluble carbohydrates for further fermentation to produce ethanol and hydrogen [26]. Microbiological waste recycling has opened up new ways to increase the value of defective fruits and vegetables. Also, by processing waste from fruits and vegetables, high-quality goods are produced, such as fermented beverages (vinegar), polysaccharides, dietary fibers, polyphenols, biopigments (carotenoids), flavors (vanillin), biopesticides, plant growth regulators, enzymes (cellulase, amylase, protease, phytase, etc.), biohydrogen, bioethanol and biogas [27–31]. Acidogenic fermentation of waste fruits and vegetables results in lactic acid [32], and the process of hydrolysis using crude enzyme mixtures results in succinic acid [25].

India is the largest milk producing country in the world. While manufacturing dairy products, the country produces 1–3 times more wastewater for each volume of processed milk. Thus, 3.739–11.217 million m<sup>3</sup> of waste is generated per year [33]. For example, cheese production produces a by-product in the form of whey. As a result, 1 kg of finished cheese accounts for 9 kg of whey [34]. Another component of dairy products, namely raw milk, contains ammonia, nitrogen and nitrates, which turn into nitrites, causing methemoglobinemia, which can further lead to groundwater contamination [35–38].

It should be noted that dairy waste has a rich organic composition, which promotes the growth of microorganisms. It follows that a large number of value-added products can be obtained by using dairy waste products such as lactose and protein [39]. These wastes are a suitable substrate for the production of ethanol using unicellular microscopic fungi (*Saccharomyces cerevisiae*) using enzymatic hydrolysis of fermented sugar [34]. Filamentous fungi produce a variety of enzymes capable of hydrolyzing complex carbohydrates to simple sugars. This ensures high-quality biomass production, which can be used not only as animal or fish feed, but also in human food in the form of a single-celled protein with GRAS status (GRAS stands for the US Food and Drug Administration, according to which a chemical or substance added to food is considered by experts safe) [33].

The fat and oil industry in India produces waste at various stages of the processing process: degumming, neutralization, bleaching, deodor-

ization, oxidative or hydrolytic rancidity resulting from lipid oxidation [40]. As noted in [41], the Indian fat and oil industry annually produces 350.9 million tons of low-fat cake, which is a concentrated source of protein, as a by-product. After pretreatment, these wastes are further used to prepare food, animal feed and fertilizers.

As a rule, wastewater from the oil processing industry enters directly into the soil and groundwater, which leads to the formation of an oily film on the water surface, seriously endangering the lives of inhabitants of aquatic ecosystems. In addition, the authors of the work [40] note that this leads to clogging of wastewater, as well as to the methanization of oil, which in turn exacerbates the greenhouse effect. As part of the advanced methods of processing the above-mentioned waste, microbial cells are used to biodegrade organic matter from wastewater, thereby ensuring the production of various high-quality products, for example, biologically based zwitterionic biosurfactants [42, 43]. It has been established that waste products from the fat and oil industry, such as tocopherols, sterols and squalene, are a cheap resource for the production of healthy food products, as well as pharmaceuticals and cosmetic products [44].

The meat, poultry and egg processing industry in India is a huge segment of the food chain system. At the same time, a huge number of animal by-products, slaughterhouse waste and wastewater are produced [45, 46]. The main industrial wastes are feathers, hair, skin, horns, hooves, soft meat, bones, etc. In addition, slaughterhouse wastewater contains blood, protein, animal fat (lard), detergent residues, as well as organic substances (carbon, nitrogen and phosphorus). The processing of perishable animal waste makes it possible to use an alternative way to eliminate an environmental problem and obtain value-added goods. The processing industry of India produces meat and bone meal, hydrolyzed feather flour, blood meal, fish meal [47]. Lactic acid fermentation of slaughterhouse waste is a promising approach to using these wastes to grow a culture of lactic acid bacteria that can be used to create probiotic drugs [48]. Due to its rich nutritional composition, slaughterhouse waste can be used to produce various value-added products. For example, the biomass of *Scenedesmus* sp. It can be used as fish feed [47], a substitute for clean energy, i.e. methane produced during anaerobic digestion of wastewater [47], biogas production from bird droppings and non-food applications (fertilizer, binder) [46]. Biodiesel can be obtained in various ways:

from chicken manure by a pseudocatalytic transesterification reaction; from pork fat waste by fermentation using the bacterium *Staphylococcus xylosum*; from eggshells by transesterification of triglycerides with methanol using homogeneous catalysts [49]. All this has multifactorial applications in the pharmaceutical and cosmetic industries.

**Household and agricultural industry waste in China and its valorization.** Urbanization, rapid economic development and uncontrolled population growth have increased food consumption, which has led to a multiple increase in so-called kitchen waste [50], which is a type of anthropogenic organic waste, usually dumped by households, etc. [51–53]. Currently, China annually produces more than 30 million tons of kitchen food waste outside the food supply chain [51].

Kitchen waste includes fruits, vegetables, boiled food waste, meat, waste fat, oil and lard. In percentage, kitchen waste mainly consists of fruits – 38.2%, vegetables – 41.5%, basic foodstuffs – 7.6%, eggshells – 7.2%, shells and bones – 2.5% and meat – 2.3% [51, 54]. The chemical composition of kitchen waste includes carbohydrate polymers (cellulose, hemicellulose, pectin and starch), protein, lignin, fats, organic acids, inorganic salts, etc. [53, 55]. Kitchen waste is generated during the processing of food products: processing, production, storage, transportation and consumption. Wastewater from home kitchens is generated during various activities, such as washing and rinsing food, cooking, washing dishes, kitchen utensils and in the process of general household management. Traditional methods of kitchen waste disposal, such as backfilling, composting, incineration and direct or indirect discharge of wastewater into the ecological system cause significant damage to the ecosystem and human health [56, 57]. Kitchen waste is a biodegradable biomass with high moisture content and a supply of nutrients that provoke the growth of pathogenic microorganisms that cause rotting and reproduction of flies and mosquitoes. At the same time, toxic substances, greenhouse gases are released, a huge amount of filtrate is drained into reservoirs, and an unpleasant smell of ammonia and hydrogen sulphide is formed. Uncontrolled formation and improper disposal of kitchen waste can lead to life-threatening consequences in the environment. Kitchen waste can be used as a substrate for the production of numerous products, namely butanol produced by the bacterium *Pseudomonas aeruginosa* [56] by enzymatic hydrolysis [55],

lactic acid produced by the bacterium *Lactobacillus amylophilus*, volatile fatty acids and hydrogen [52], as well as ethanol in the process of sequential liquefaction [58]. Kitchen waste can also be used to produce biogas, bioelectricity, biodiesel, etc. Nanocomposites, biopolymers and food film-like materials can be synthesized using food waste as a substrate [56]. Food waste can also be converted into a huge number of value-added products, including antioxidants, pigments, nutraceuticals, dietary fibers, organic acids, vermicompost, biofertilizers, xanthan gum and wax esters [52, 56]. All of the above significantly reduces the environmental burden [5, 52]. As the authors of the article [56] note, household waste can also be used as a substrate for the production of biosurfactant, which helps to reduce cost and at the same time reduce the level of environmental pollution.

China's agricultural waste is an organic substance that includes straw, cake, molasses, grain pellets, husks (rice, corn and wheat), shells (walnuts, coconut and peanuts), peel (banana, avocado), stems of crops (cotton), vegetable waste, as well as livestock manure and birds [54, 59, 60]. According to FAO estimates, annually about 250 million tons of inedible plant waste are converted into agro-industrial waste during the processing of various crops [61]. China, being the world's largest grain producer, annually produces  $1.75 \cdot 10^9$  tons of agricultural waste, of which  $9.93 \cdot 10^8$  tons are obtained from straw crops,  $4.52 \cdot 10^8$  tons from livestock and poultry manure and  $3.03 \cdot 10^8$  tons of forest residues [59, 62].

As a rule, agricultural waste is either burned or left to rot in the fields, which causes air, soil, and water pollution. The use of traditional approaches to the disposal of agricultural waste contributes to the release of toxic and greenhouse gases, as well as other carcinogenic chemicals such as dioxins, furans and polycyclic aromatic hydrocarbons. All of the above causes damage to the environment, as well as human health [63]. Agricultural waste is biodegradable and organic, and also has a supply of nutrients such as polysaccharides (starch, cellulose, hemicellulose), proteins, lignins, fibers, minerals, vitamins and others [64–66]. In addition, the chemical composition of agricultural waste proves that they are a universal source for the synthesis of a number of products, for example, bioplastics from the cuticle, a protective layer that is formed with the help of epidermal cells on the outer layer of plant parts: leaves, stems, etc. [61].

Agricultural waste, namely, the use of peel, seeds, cake, field residues and bran, can be a

cheap and natural material for the production of high-quality products such as pigments, phytochemicals, antibiotics, various enzymes (endoglucanase, -glucosidase, amylase, glucoamylase) [67–69]. For example, xanthan, synthesized by the bacterium *Xanthomonas campestris*, is a type of exopolysaccharide and is used as a food additive in the Chinese food industry [70].

Food additives in China play a significant role in improving the technological properties of food products. For example, mushrooms are an ecologically balanced crop obtained using lignocellulose agricultural waste (banana leaves, cotton stalks) [70, 71].

Waste from the agricultural industry can be used to produce substitutes for building materials such as fiber board, thermal insulation walls and roofs, as well as bricks made from recycled paper and cotton, the advantages of which are lightness, biodegradability and environmental friendliness of use. For example, a cement substitute is produced in China from sugar industry waste (sugar cane pulp) and oil palm shells [64, 72, 73].

From the analyzed material, we have selected and presented in the table individual examples of research in the field of valorization of food waste into value-added products (Table).

### Conclusion

Thus, with the growth of knowledge and research, it has become possible to increase the value of food waste generated during technological processes that can be safely processed into value-added bio-products. The examples presented in the article illustrate potential ways to further solve the problems associated with the processing of food waste. The analyzed experience of Asian countries on the valorization of food waste shows that valorization may be in demand at the present time due to the rapid depletion of natural resources, an increase in waste generation and disposal worldwide and the need to develop more sustainable and cost-effective waste management methods, and may also prove to be an effective tool for the disposal of organic compounds with benefits for economy

Table

Research in the field of valorization of food waste into value-added products

Substrate	Biological process	Microorganisms	Final product	Link
Waste from cooking olive oil	Fermentation	<i>Penicillium expansum</i>	Biodiesel fuel	[73]
Mixed food waste (banana peel, household waste)	Enzymatic hydrolysis and fermentation	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Bioethanol	[31]
Food waste	Enzymatic hydrolysis	<i>Bacillus licheniformis</i> , <i>Thermomyces lanuginosus</i> (L0777)	Biooil	[31]
Waste vegetable oil	Enzyme immobilization	<i>Proteus mirabilis</i>	Biodiesel fuel	[75]
Cane molasses and starch-rich food waste	Fermentation	<i>Clostridium acetobutylicum</i> , <i>Clostridium beijerinckii</i> P260	Bioethanol	[76]
Mixed food waste	Microbiological electrolysis cell and anaerobic digestion	<i>Methanosarcina thermophila</i> , <i>Methanobacterium formicicum</i> , <i>M. beijingense</i> , <i>M. petrolearium</i> , <i>Clostridia</i> sp., <i>Bacteroidia</i> sp., etc.	Methane	[77]
Carbohydrate-rich food waste	Fermentation	<i>Clostridium</i> sp., <i>Enterobacter</i> sp.	Biohydrogen	[12]
Industrial and domestic wastewater	Anaerobic digestion	<i>Scenedesmus</i> sp.	Methane	[47]
Waste from the meat processing industry	Fermentation	<i>Staphilococcus xylosus</i>	Biodiesel fuel	[49]
Kitchen waste oil	Fermentation	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Biosurfactant	[41]
Dairy waste	Enzymatic hydrolysis	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Ethanol	[34]
Nutrient-rich food waste	Hydrolysis, fermentation and biosynthesis	<i>Halomonashydr othermalis</i> , <i>Halomonascamp aniensis</i>	Polyhydroxybutyrate (PHB)	[13]

and environment. The lack of technologies for deep processing of agricultural products in the Kirov region forces us to look for a solution to this problem, using a range of measures, including Indian and Chinese agriculture, and in the future developing industrial cooperation, creating joint projects, building new logistics chains.

## References

- Bernstad A., la Cour Jansen J. Review of comparative LCAs of food waste management systems – current status and potential improvements // *Waste Manag.* 2012. V. 32. No. 12. P. 2439–2455. doi: 10.1016/j.wasman.2012.07.023
- Hebrok M., Boks C. Household food waste: drivers and potential intervention points for design – an extensive review // *J. Clean. Prod.* 2017. V. 151. No. 3. P. 380–392. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.069
- Schanes K., Dobernig K., Gözet B. Food waste matters – a systematic review of household food waste practices and their policy implications // *J. Clean. Prod.* 2018. V. 182. P. 978–991. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.030
- Xue L., Liu G., Parfitt J., Liu X., van Herpen E., Stenmarck Å., O'Connor C., Östergren K., Cheng S. Missing food, missing data? A critical review of global food losses and food waste data // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. No. 12. P. 6618–6633. doi: 10.1021/acs.est.7b00401
- Li Y., Wang L.E., Liu G., Cheng S. Rural household food waste characteristics and driving factors in China // *Resour. Conserv. Recycl.* 2021. V. 164. No. 3. Article No. 105209. doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105209
- Shamtsyan M.M., Kolesnikov B.A., Klepikov A.A., Kasyan O.V. Biotechnological processing of agricultural and food industry waste // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Division of Chemical Science.* 2011. V. 55. No. 1. P. 17–25 (in Russian).
- Gustavsson J., Cederberg C., Sonesson U., van Otterdijk R., Meybeck A. *Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention.* Rome: FAO, 2011. 29 p.
- Kummu M., de Moel H., Porkka M., Siebert S., Varis O., Ward P.J. Lost food wasted resources: global food supply chain losses and their impacts on freshwater, cropland, and fertiliser use // *Sci. Total Environ.* 2012. V. 438. P. 477–489. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.092
- Mak T.M.W., Xiong X., Tsang D.C.W., Yu I.K.M., Poon C.S. Sustainable food waste management towards circular bioeconomy: Policy review, limitations and opportunities // *Bioresour. Technol.* 2020. V. 297. Article No. 122497. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122497
- Karthikeyan O.P., Trably E., Mehariya S., Bernet N., Wong J.W., Carrere H. Pretreatment of food waste for methane and hydrogen recovery: a review // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 249. P. 1025–1039. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.105
- Paritosh K., Kushwaha S.K., Yadav M., Pareek N., Chawade A., Vivekanand V. Food waste to energy: An overview of sustainable approaches for food waste management and nutrient recycling // *Biomed Res. Int.* 2017. V. 2017. Article No. 2370927. doi: 10.1155/2017/2370927
- Uckun Kiran E., Trzcinski A.P., Ng W.J., Liu Y. Bioconversion of food waste to energy: A review // *Fuel.* 2014. V. 134. P. 389–399. doi: 10.1016/j.fuel.2014.05.074
- Tsang Y.F., Kumar V., Samadar P., Yang Y., Lee J., Ok Y.S., Song H., Kim K.H., Kwon E.E., Jeo Y.J. Production of bioplastic through food waste valorization // *Environ. Int.* 2019. V. 127. P. 625–644. doi: 10.1016/j.envint.2019.03.076
- Recycled resources [Internet resource] [https://www.kirovreg.ru/econom/Invest2/invclimate/invpotential/recycled\\_resources.php?ysclid=lu9t4i1iep578743265](https://www.kirovreg.ru/econom/Invest2/invclimate/invpotential/recycled_resources.php?ysclid=lu9t4i1iep578743265) (Accessed: 27.03.2024).
- Uralchem Innovation launches Russia's first pea protein production facility [Internet resource] <https://www.uralchem.ru/press/news/item28603/#> (Accessed: 28.03.2024).
- Papageorgiou M., Skendi A. Introduction to cereal processing and by-products // *Sustainable recovery and reutilization of cereal processing by-products* / Ed. C.M. Galanakis. Elsevier, 2018. P. 1–25. doi: 10.1016/B978-0-08-102162-0.00001-0
- Anal A.K. *Food Processing By-Products and their Utilization: Introduction* / *Food Processing By-Products and their Utilization.* London: John Wiley & Sons Ltd., 2017. P. 1–10. doi: 10.1002/9781118432921.ch1
- Parate V.R., Talib M.I. Study of metal adsorbent prepared from Tur Dal (*Cajanus cajan*) Husk: A value addition to agro-waste // *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology.* 2014. V. 8. No. 9. P. 43–54. doi: 10.9790/2402-08934354
- Kumar S., Sangwan P., Dhankhar R. Mor V., Bidra S. Utilization of rice husk and their ash: A review // *Res. J. Chem. Environ. Sci.* 2013. V. 1. No. 5. P. 126–129.
- Kumar A., Kumar D., George N., Sharma P., Gupta N. A process for complete biodegradation of shrimp waste by a novel marine isolate *Paenibacillus* sp. AD with simultaneous production of chitinase and chitin oligosaccharides // *Int. J. Biol. Macromol.* 2018. V. 109. P. 263–272. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.12.024
- Dede O.H., Ozdemir S. Development of nutrient-rich growing media with hazelnut husk and municipal sewage sludge // *Environ. Technol.* 2018. V. 39. No. 17. P. 2223–2230. doi: 10.1080/09593330.2017.1352038
- Tan L., Sun Z., Zhang W., Tang Y., Morimura S., Kida K. Production of bio-fuel ethanol from distilled grain waste eluted from Chinese spirit making process // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2014. V. 37. No. 10. P. 2031–2038. doi: 10.1007/s00449-014-1178-5
- Ji C., Kong C.X., Mei Z.L., Li J. A review of the anaerobic digestion of fruit and vegetable waste // *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2017. V. 183. No. 3. P. 906–922. doi: 10.1007/s12010-017-2472-x

24. Panda S.K., Mishra S.S., Kayitesi E., Ray R.C. Microbial-processing of fruit and vegetable wastes for production of vital enzymes and organic acids: Biotechnology and scopes // *Environ. Res.* 2016. V. 146. P. 161–172. doi: 10.1016/j.envres.2015.12.035
25. Dessie W., Zhang W., Xin F., Dong W., Zhang M., Ma J., Jiang M. Succinic acid production from fruit and vegetable wastes hydrolyzed by on-site enzyme mixtures through solid state fermentation // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 247. P. 1177–1180. doi: 10.1016/j.biortech.2017.08.171
26. Díaz A.I., Laca A., Laca A., Díaz M. Treatment of supermarket vegetable wastes to be used as alternative substrates in bioprocesses // *Waste Manag.* 2017. V. 67. P. 59–66. doi: 10.1016/j.wasman.2017.05.018
27. Schieber A. Side streams of plant food processing as a source of valuable compounds: Selected examples // *Annu. Rev. Food Sci. Technol.* 2017. V. 8. No. 1. P. 97–112. doi: 10.1146/annurev-food-030216-030135
28. Sabu A., Sarita S., Pandey A., Bogar B., Szakacs G., Soccol C.R. Solid-state fermentation for production of phytase by *Rhizopus oligosporus* // *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2002. V. 102–103. No. 1–6. P. 251–260. doi: 10.1385/abab:102-103:1-6:251
29. Pandey A., Soccol C.R. Economic utilization of crop residues for value addition: A futuristic approach // *J. Sci. Ind. Res.* 2000. V. 59. P. 12–22.
30. Benjamin S., Pandey A. Coconut cake – a potent substrate for the production of lipase by *Candida rugosa* in solid-state fermentation // *Acta Biotechnol.* 1997. V. 17. No. 3. P. 241–251. doi: 10.1002/abio.370170308
31. Karmee S.K. Liquid biofuels from food waste: Current trends, prospect and limitation // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. V. 53. No. 7. P. 945–953. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.041
32. Wu Y., Ma H., Zheng M., Wang K. Lactic acid production from acidogenic fermentation of fruit and vegetable wastes // *Bioresour. Technol.* 2015. V. 191. P. 53–58. doi: 10.1016/j.biortech.2015.04.100
33. Mahboubi A., Ferreira J.A., Taherzadeh M.J., Lennartsson P.R. Value-added products from dairy waste using edible fungi // *Waste Manag.* 2017. V. 59. Article No. 518. doi: 10.1016/j.wasman.2016.11.017
34. Parashar A., Jin Y., Mason B., Chae M., Bressler D.C. Incorporation of whey permeate, a dairy effluent, in ethanol fermentation to provide a zero waste solution for the dairy industry // *J. Dairy Sci.* 2016. V. 99. No. 3. P. 1859–1867. doi: 10.3168/jds.2015-10059
35. Singh N.B., Singh R., Imam M.M. Waste water management in dairy industry: pollution abatement and preventive attitudes // *Int. J. Sci. Environ. Technol.* 2014. V. 3. No. 2. P. 672–683.
36. Kushwaha J.P., Srivastava V.C., Mall I.D. An overview of various technologies for the treatment of dairy wastewaters // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 2011. V. 51. No. 5. P. 442–452. doi: 10.1080/10408391003663879
37. Fewtrell L. Drinking-water nitrate, methemoglobinemia, and global burden of disease: a discussion // *Environ. Health Perspect.* 2004. V. 112. No. 14. P. 1371–1374. doi: 10.1289/ehp.7216
38. Dias T., Fragoso R., Duarte E. Anaerobic co-digestion of dairy cattle manure and pear waste // *Bioresour. Technol.* 2014. V. 164. P. 420–423. doi: 10.1016/j.biortech.2014.04.110
39. Lappa I.K., Papadaki A., Kachrimanidou V., Terpou A., Koulougliotis D., Eriotou E., Kopsahelis N. Cheese whey processing: Integrated biorefinery concepts and emerging food applications // *Foods.* 2019. V. 8. No. 8. Article No. 347. doi: 10.3390/foods8080347
40. Okino-Delgado C.H., Prado D.Z.D., Facanali R., Marques M.M.O., Nascimento A.S., da Costa Fernandes C.J., Zambuzzi W.F., Fleuri L.F. Bioremediation of cooking oil waste using lipases from wastes // *PloS One.* 2017. V. 12. No. 10. Article No. 0186246. doi: 10.1371/journal.pone.0186246
41. Chang F.C., Tsai M.J., Ko C.H. Agricultural waste derived fuel from oil meal and waste cooking oil // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. No. 6. P. 5223–5230. doi: 10.1007/s11356-017-9119-x
42. Henkel M., Müller M.M., Kügler J.H., Lovaglio R.B., Contiero J., Syldatk C., Hausmann R. Rhamnolipids as biosurfactants from renewable resources: Concepts for next-generation rhamnolipid production // *Process Biochem.* 2012. V. 47. No. 8. P. 1207–1219. doi: 10.1016/j.procbio.2012.04.018
43. Chen C., Sun N., Li D., Long S., Tang X., Xiao G., Wang L. Optimization and characterization of biosurfactant production from kitchen waste oil using *Pseudomonas aeruginosa* // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. V. 25. No. 15. P. 14934–14943. doi: 10.1007/s11356-018-1691-1
44. Hussain Sherazi S.T., Mahesar S.A., Sirajuddin. Vegetable oil deodorizer distillate: A rich source of the natural bioactive components // *J. Oleo Sci.* 2016. V. 65. No. 12. P. 957–966. doi: 10.5650/jos.ess16125
45. Ning Z., Zhang H., Li W., Zhang R., Liu G., Chen C. Anaerobic digestion of lipid-rich swine slaughterhouse waste: Methane production performance, long-chain fatty acids profile and predominant microorganisms // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 269. P. 426–433. doi: 10.1016/j.biortech.2018.08.001
46. Adhikari B., Chae M., Bressler D. Utilization of slaughterhouse waste in value-added applications: Recent advances in the development of wood adhesives // *Polymers.* 2018. V. 10. No. 2. Article No. 176. doi: 10.3390/polym10020176
47. Yaakob M.A., Mohamed R.M.S.R., Al-Gheethi A., Tey A., Kassim A.H.M. Optimising of *Scenedesmus* sp. biomass production in chicken slaughterhouse wastewater using response surface methodology and potential utilisation as fish feeds // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2019. V. 26. No. 12. P. 12089–12108. doi: 10.1007/s11356-019-04633-0

48. Ashayerizadeh O., Dastar B., Samadi F., Khomeiri M., Yamchi A., Zerehdaran S. Study on the chemical and microbial composition and probiotic characteristics of dominant lactic acid bacteria in fermented poultry slaughterhouse waste // *Waste Manag.* 2017. V. 65. P. 178–185. doi: 10.1016/j.wasman.2017.04.017
49. Marques R.V., Paz M.F.D., Duval E.H., Corrêa L.B., Corrêa É.K. *Staphylococcus xylosus* fermentation of pork fatty waste: raw material for biodiesel production // *Braz. J. Microbiol.* 2016. V. 47. No. 3. P. 675–679. doi: 10.1016/j.bjm.2016.04.018
50. Zhao J., Liu Y., Wang D., Chen F., Li X., Zeng G., Yang Q. Potential impact of salinity on methane production from food waste anaerobic digestion // *Waste Manag.* 2017. V. 67. P. 308–314. doi: 10.1016/j.wasman.2017.05.016
51. Li P., Zeng Y., Xie Y., Li X., Kang Y., Wang Y., Xie T., Zhang Y. Effect of pretreatment on the enzymatic hydrolysis of kitchen waste for xanthan production // *Bioresour. Technol.* 2017. V. 223. P. 84–90. doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.035
52. Liu W., Dong Z., Sun D., Chen Y., Wang S., Zhu J., Liu C. Bioconversion of kitchen wastes into bioflocculant and its pilot-scale application in treating iron mineral processing wastewater // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 288. Article No. 121505. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121505
53. Zhao K., Xu R., Zhang Y., Tang H., Zhou C., Cao A., Zhao G., Guo H. Development of a novel compound microbial agent for degradation of kitchen waste // *Braz. J. Microbiol.* 2017. V. 48. No. 3. P. 442–450. doi: 10.1016/j.bjm.2016.12.011
54. Nita C., Zhang B., Dentzer J., Matei Ghimbeu C. Hard carbon derived from coconut shells, walnut shells, and corn silk biomass waste exhibiting high capacity for Na-ion batteries // *J. Energy Chem.* 2021. V. 58. P. 207–218. doi: 10.1016/j.jechem.2020.08.065
55. Chen H., Shen H., Su H., Chen H., Tan F., Lin J. High-efficiency bioconversion of kitchen garbage to biobutanol using an enzymatic cocktail procedure // *Bioresour. Technol.* 2017. V. 245. Pt. A. P. 1110–1121. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.056
56. Chen J., Ma X., Yu Z., Deng T., Chen X., Chen L., Dai M. A study on catalytic co-pyrolysis of kitchen waste with tire waste over ZSM-5 using TG-FTIR and Py-GC/MS // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 289. No. 1. Article No. 121585. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121585
57. Kalabin O.V., Bruk T.M., Bykova I.V., Udovenko E.V. Influence of radioecological pollution on heart rate variability in young men of different somatotypes // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 4. P. 232–237. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-232-239
58. Nishimura H., Tan L., Kira N., Tomiyama S., Yamada K., Sun Z.Y., Tang Y.Q., Morimura S., Kida K. Production of ethanol from a mixture of waste paper and kitchen waste via a process of successive liquefaction, pre-saccharification, and simultaneous saccharification and fermentation // *Waste Manag.* 2017. V. 67. P. 86–94. doi: 10.1016/j.wasman.2017.04.030
59. Dai Y., Sun Q., Wang W., Lu L., Liu M., Li J., Yang S., Sun Y., Zhang K., Xu J., Zheng W., Hu Z., Yang Y., Gao Y., Chen Y., Zhang X., Gao F., Zhang Y. Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review // *Chemosphere.* 2018. V. 211. P. 235–253. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.179
60. Chan Y.H., Loh S.K., Fui Chin B.L., Yiin C.L., How B.S., Cheah K.W., Wong M.K., Minh Loy A.C., Gwee Y.L., Yuen Lo S.L., Yusup S., Lam S.S. Fractionation and extraction of bio-oil for production of greener fuel and value-added chemicals: Recent advances and future prospects // *Chem. Eng. J.* 2020. V. 397. Article No. 125406. doi: 10.1016/j.cej.2020.125406
61. Heredia-Guerrero J.A., Heredia A., Domínguez E., Cingolani R., Bayer I.S., Athanassiou A., Benítez J.J. Cutin from agro-waste as a raw material for the production of bioplastics // *J. Exp. Bot.* 2017. V. 68. No. 19. P. 5401–5410. doi: 10.1093/jxb/erx272
62. Banerjee S., Arora A. Sustainable bioprocess technologies for urban waste valorization // *Case Stud. Chem. Environ. Eng.* 2021. V. 4. Article No. 100166. doi: 10.1016/j.csee.2021.100166
63. Cheng H., Hu Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China // *Bioresour. Technol.* 2010. V. 101. No. 11. P. 3816–3824. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.040
64. Madurwar M.V., Ralegaonkar R.V., Mandavgane S.A. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review // *Constr. Build. Mater.* 2012. V. 38. No. 1. P. 872–878. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.011
65. Dutta S., He M., Xiong X., Tsang D.C. Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: A review // *Bioresour. Technol.* 2021. V. 341. Article No. 125915. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125915
66. Haldar D., Shabbirahmed A.M., Singhania R.R., Chen C.W., Dong C.D. Ponnusamy V.K., Patel A.K. Understanding the management of household food waste and its engineering for sustainable valorization – A state-of-the-art review // *Bioresour. Technol.* 2022. V. 358. Article No. 127390. doi: 10.1016/j.biortech.2022.127390
67. Bogar B., Szakacs G., Linden J.C., Pandey A., Tengerdy R.P. Optimization of phytase production by solid substrate fermentation // *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 2003. V. 30. No. 3. P. 183–189. doi: 10.1007/s10295-003-0027-3
68. Bogar B., Szakacs G., Pandey A., Abdulhameed S., Linden J.C., Tengerdy R.P. Production of phytase by *Mucor racemosus* in solid-state fermentation // *Biotechnol. Prog.* 2003. V. 19. No. 2. P. 312–319. doi: 10.1021/bp020126v
69. Selvakumar P., Ashakumary L., Pandey A. Biosynthesis of glucoamylase from *Aspergillus niger* by solid-state fermentation using tea waste as the basis of a solid substrate // *Bioresour. Technol.* 1998. V. 65. P. 83–85. doi: 10.1016/s0960-8524(98)00012-1
70. Sadh P.K., Duhan S., Duhan J.S. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation:

A review // Bioresour. Bioprocess. 2018. V. 5. Article No. 4. doi: 10.1186/s40643-017-0187-z

71. Philippoussis A.N. Production of mushrooms using agro-industrial residues as substrates // Biotechnology for agro-industrial residues utilization / Eds. P. Singh Nee' Nigam, A. Pandey. Dordrecht: Springer, 2009. P. 163–196. doi: 10.1007/978-1-4020-9942-7\_9

72. Hussein M.H., El-Hady M.F., Shehata H.A., Hegazy M.A., Hefni H.H. Preparation of some eco-friendly corrosion inhibitors having antibacterial activity from sea food waste // J. Surfactants and Deterg. 2013. V. 16. No. 2. P. 233–242. doi: 10.1007/s11743-012-1395-3

73. Papanikolaou S., Dimou A., Fakas S., Diamantopoulou P., Philippoussis A., Galiotou-Panayotou M., Aggelis G. Biotechnological conversion of waste cooking olive oil into lipid-rich biomass using *Aspergillus* and *Penicillium* strains // J. Appl. Microbiol. 2011. V. 110. No. 5. P. 1138–1150. doi: 10.1111/j.1365-2672.2011.04961.x

74. Baykova O.V., Pugach V.N., Kazakov A.V. The entrepreneurial method as a way to solve the problems of processing wood waste in a circular economy // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 224–231. doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-224-231

75. Heater B.S., Chan W.S., Lee M.M., Chan M.K. Directed evolution of a genetically encoded immobilized lipase for the efficient production of biodiesel from waste cooking oil // Biotechnol. Biofuels. 2019. V. 12. No. 1. Article No. 165. doi: 10.1186/s13068-019-1509-5

76. Girotto F., Alibardi L., Cossu R. Food waste generation and industrial uses: A review // Waste Manag. 2015. V. 45. P. 32–41. doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.008

77. Park J., Lee B., Tian D., Jun H. Bioelectrochemical enhancement of methane production from highly concentrated food waste in a combined anaerobic digester and microbial electrolysis cell // Bioresour. Technol. 2018. V. 247. P. 226–233. doi: 10.1016/j.biortech.2017.09.021

## IX Съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева

© 2024. Н. О. Ковалева, д. б. н., зав. лабораторией,  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
119991, Россия, г. Москва, Воробьевы горы, МГУ, д. 1., стр. 12,  
e-mail: natalia\_kovaleva@mail.ru

## IX Congress of the V.V. Dokuchaev Soil Science Society

© 2024. N. O. Kovaleva ORCID: 0000-0002-8672-256X  
Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory St., Moscow, Russia, 119991,  
e-mail: natalia\_kovaleva@mail.ru

С 12 по 16 августа 2024 г. в г. Казани (Республика Татарстан) на базе Казанского (Приволжского) Федерального Университета под девизом «Почвы – опора России» состоялся IX съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева (см. цв. вкладку VI). Всероссийский съезд почвоведов 2024 г. стал долгожданным очным собранием учёных, преподавателей, работников аграрного сектора и природоохранных организаций, представителей органов государственной власти и бизнеса не только со всех регионов России, но и из стран дальнего и ближнего зарубежья, и обеспечил плодотворный профессиональный диалог по актуальным проблемам почвоведения и экологии, землепользования и изменений климата, сельского и лесного хозяйства, продовольственной безопасности и устойчивого развития, стал площадкой для обмена опытом и идеями, для становления новых прорывных направлений в развитии науки о почвах и основой для выработки действенных управленческих решений.

Для участия в научном форуме зарегистрировалось 785 человек из 72 городов, из них 474 человека лично приняли участие в работе съезда, в том числе учёные не только из России, но и из Казахстана, Мексики, Чили, Беларуси, Узбекистана, Индии, Италии, Омана, США. Среди участников съезда было 125 делегатов – членов Центрального совета, председателей региональных отделений и выбранных от отделений представителей.

Научная программа IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева состояла из пленарного заседания, с трансляцией которого можно ознакомиться на сайте съезда ([https://vk.com/video-22463417\\_456251827?list=ln-](https://vk.com/video-22463417_456251827?list=ln-)

[хуq1gZrDUARIMt5gKE](#)), работы семи крупных симпозиумов, 23 секций (комиссий, подкомиссий и рабочих групп), трёх круглых столов и трёх научно-полевых экскурсий.

Пленарное заседание открывали приветствия участникам форума от помощника президента Российской Федерации Р.С.-Х. Эдельгериева, от председателя Комитета по аграрной политике и природопользованию Совета Федерации России А.В. Двойных, от заместителя председателя Государственной Думы Российской Федерации академика А.В. Гордеева, а также от президента Общества почвоведов им. В.В. Докучаева члена-корреспондента РАН П.В. Красильникова, заместителя президента РАН академика П.А. Чекмарева, заместителя премьер-министра Республики Татарстан Министра сельского хозяйства и продовольствия Татарстана М.А. Зяббарова, президента Академии наук Республики Татарстан академика Р.Н. Минниханова, президента Казанского (Приволжского) Федерального Университета Р.Г. Минзарипова, президента Международного союза наук о почве (IUSS) Эдоардо Костантини (Италия).

Ключевыми спикерами пленарной сессии стали ведущие представители науки России: президент Общества почвоведов им. В.В. Докучаева член-корреспондент РАН П.В. Красильников, заместитель президента РАН академик П.А. Чекмарев, директор ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», академик РАН А.Л. Иванов, директор Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН член-корреспондент РАН Н.В. Лукина.

Для выступлений на семи симпозиумах съезда были приглашены 58 ведущих учё-

ных из различных организаций с докладами по наиболее актуальным проблемам оценки и мониторинга пулов углерода и углеродной нейтральности России; по внедрению и развитию геоинформационных технологий в картографировании и инвентаризации почв; по изучению палеопочвенных архивов разных периодов геологической истории планеты и эволюции педосферы Земли; по ландшафтно-экологическим проблемам агрономического почвоведения и совершенствованию методов оценки продукционного потенциала почв в условиях изменения землепользования; по прогнозу и моделированию биокосных взаимодействий в условиях изменений климата и перспективам развития биотехнологий; по рекультивации техногенно-изменённых почв и ландшафтов и технологиям восстановления нарушенных земель; по проблемам генетического почвоведения и классификации почв.

Не менее острые вопросы и дискуссии звучали на заседаниях комиссий, подкомиссий и рабочих групп, которые заслушали и обсудили 450 устных и 49 стендовых докладов по вопросам агро- и гидрофизики почв; о необходимости развития методов математического моделирования почвенных процессов; по нормированию и особенностям накопления и перераспределения подвижных форм тяжёлых металлов в почвах в зависимости от положения в рельефе и агротехнических условий, в системе «почва-пыль»; по прогнозированию состояния почв при изменении техногенной нагрузки на основе изучения процессов сорбции-десорбции органических поллютантов; по теории гумусообразования и структурной биохимии органического вещества почв.

Ознакомиться с рабочими материалами выступлений можно на сайте съезда: <https://kpfu.ru/glavnaya/soilkazan2024/publikaci>.

Актуальные проблемы минералогической химии почв, горного почвоведения и почвенно-экологической экспертизы были подняты в ходе работы трёх круглых столов.

Во время съезда состоялись два однодневных научно-полевых выезда: 1) экскурсия в Волжско-Камский заповедник для знакомства с почвами, сформированными на надпойменных террасах р. Волги и осмотра дендрария, коллекция которого является наиболее крупной в Поволжье; 2) экскурсии на остров-град Свияжск для изучения особенностей почвообразования на элювии пестроцветных глин татарского яруса перми. По окончании работы форума 17–18 августа

состоялась многодневная научно-полевая экскурсия в национальный парк «Нижняя Кама» для знакомства с почвами уникального природного комплекса лесных и пойменно-луговых сообществ северо-востока Республики Татарстан.

В рамках съезда 13–14 августа была организована и успешно проведена Школа молодых учёных (ШМУ) по палеопочвоведению, в которой приняло участие около 40 студентов и аспирантов из различных ВУЗов Москвы, Санкт-Петербурга, Владивостока, Казани, Красноярска, Перми, Нижневартовска, Пущино. Программа Школы включала лекции ведущих учёных по палеопочвоведению, полевой мастер-класс на геологическом разрезе Черемушка, вскрывающем погребённые почвы и красноцветные отложения пермского возраста. Завершением полевого выезда стало посещение опорного стратиграфического разреза и археологического комплекса Печищи, а в университете состоялась экскурсия в музей химической школы КФУ и стендовая сессия ШМУ. Особое внимание в выработанной съездом резолюции уделено формированию новых кадров для почвенной науки и практики, поскольку реализация масштабных национальных проектов требует молодых квалифицированных специалистов.

Итогом работы IX съезда Общества почвоведов им. В.В. Докучаева стало делегатское собрание, которое заслушало отчёты Центрального совета и Ревизионной комиссии Общества о работе за межсъездовский период 2022–2024 гг. и провело выборы Президента, Почётных членов и членов Центрального совета Общества на следующий срок. В Устав были внесены изменения, позволяющие сформировать попечительский совет Общества почвоведов им. В.В. Докучаева, в который будут приглашены представители государственной власти, бизнеса и общественных организаций, заинтересованные в рациональном использовании почвенных ресурсов страны. Президентом Общества почвоведов им. В.В. Докучаева на новый срок избран и. о. декана факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова член-корреспондент РАН П.В. Красильников.

IX съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева в 2024 г. включён в список юбилейных мероприятий, посвящённых 300-летию Российской Академии наук. Оргкомитет выражает признательность Российской Академии наук, Правительству Республики

# IX Съезд Общества почвоведов им. В.В. Докучаева



Татарстан, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет», Институту проблем экологии и недропользования АН РТ (обособленное подразделение ГНБУ «Академия

наук Республики Татарстан»), Татарскому научно-исследовательскому институту сельского хозяйства (ФИЦ КазНЦ РАН), ФГБУ «Центр агрохимической службы «Татарский»» за помощь и поддержку в организации и проведении научного форума.

**Всероссийская научно-практическая конференция  
«Научные исследования как основа охраны  
природных комплексов заповедника «Нургуш»**

© 2024. Е. М. Тарасова, директор,  
Государственный природный заповедник «Нургуш»,  
610002, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 129а,  
e-mail: zapovednik@nurgush.org

**All-Russian scientific and practical conference  
“Scientific research as a basis for protecting natural complexes  
of the Nurgush Nature Reserve”**

© 2024. E. M. Tarasova, director,  
Nurgush State Nature Reserve,  
129a, Lenina St., Kirov, Russia, 610002,  
e-mail: zapovednik@nurgush.org

11–13 сентября 2024 г. в с. Ишлык Советского района Кировской области состоялась научно-практическая конференция, посвящённая 30-летию государственного природного заповедника «Нургуш» «Научные исследования как основа охраны природных комплексов заповедника «Нургуш». Организатор конференции – заповедник «Нургуш» – был создан 25 мая 1994 г. для охраны и изучения долинных хвойно-широколиственных лесов, болотных массивов, редких и исчезающих животных и растений в пойме р. Вятки.

Первая конференция «Научные исследования как основа охраны природных комплексов заповедника «Нургуш» состоялась в 2009 г. и стала традиционной для специалистов биологического и экологического профиля, чья научная деятельность связана с изучением природных комплексов заповедников и организации охраны заповедных территорий. Конференции проходят в сентябре-октябре каждые пять лет и являются своеобразным итогом деятельности научных сотрудников на особо охраняемых

природных территорий и площадкой для обмена профессиональным опытом.

В работе четвёртой конференции приняло участие более 30 человек, в том числе 5 докторов и 7 кандидатов наук, представляющих заповедники, научно-исследовательские и образовательные учреждения и органы власти из семи регионов России: Министерство охраны окружающей среды Кировской области, Общественная палата Кировской области, Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар), Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого (г. Киров), Всероссийский НИИ охотничьего хозяйства и звероводства им. проф. Б.М. Житкова (г. Киров), Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород); Нижегородский государственный педагогический университет им. Козьмы Минина (г. Нижний Новгород), Вятский государственный университет (г. Киров), Вятский государственный агротехнологический университет (г. Киров), сотрудники

государственных природных заповедников «Басеги» (Пермский край), «Большая Кокшага» (Республика Марий Эл), «Денежкин камень» (Свердловская область), «Керженский» (Нижегородская область), «Нургуш» (Кировская область), «Чёрные земли» (Республика Калмыкия).

Участников конференции приветствовали директор заповедника «Нургуш» Е.М. Тарасова, заместитель министра охраны окружающей среды Кировской области Д.С. Анисимов, д. т. н., главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории биомониторинга Вятского гуманитарного университета, член общественной палаты Кировской области Т.Я. Ашихмина, д. б. н., ведущий научный сотрудник Всесоюзного научно-исследовательского института охотничьего хозяйства и звероводства В.В. Ширяев.

На конференции было заслушано 17 докладов, посвящённых вопросам: инвентаризации биоты и мониторингу редких видов; изучению структуры и динамики сообществ в условиях заповедного режима; геохимическим циклам в почвах заповедников; разработки принципов охраны и применению ГИС-технологий для оценки экологического состояния ООПТ.

Пленарное заседание открыл доклад И.Г. Широких «Экологически значимые таксономические группы бактерий в аллювиальной дерновой почве заповедника «Нургуш» о филогенетическом разнообразии прокариотных сообществ в аллювиальных почвах заповедника, исследованных методом высокопроизводительного секвенирования на платформе Illumina.

Большой интерес вызвал пленарный доклад С.В. Бакка и Н.Ю. Киселевой о сохранении выхухоли в заповеднике «Нургуш». Реликтовый зверёк занесён в Красный список МСОП и Красную книгу Российской Федерации как исчезающий вид, находящийся в критическом состоянии. Важнейшую роль в восстановлении численности выхухоли в Кировской области сыграл Нургушский заказник, существовавший на месте современного заповедника, куда в 1959 г. были выпущены 93 зверька из Окского заповедника.

На секционных докладах были представлены результаты изучения фауны и экологии кровососущих комаров (Е.В. Панюкова), почвенной альгоцианофлоры (Л.В. Кондакова), зообентоса (Т.И. Кочурова), динамики численности гнездящихся птиц (С.В. Кондрухова), видовой разнообразия плазмодияльных

слизевиков (А.А. Широких), флоры листостебельных мхов (А.А. Шестакова), фауны и биологии стафилинид (А.А. Фатеева), ихтиофауны заповедных озёр (Г.А. Борняков), новых видов грибов (Н.Ю. Киселева) и чешуекрылых (С.В. Бакка), геохимии почв (А.В. Исаев), использования ГИС для охраны природных комплексов заповедников (А.Е. Квашнина). Официальную часть конференции завершило сообщение Н.Д. Митькиных «Портрет посетителя туристических объектов заповедника «Нургуш».

Участники конференции отметили, что научно-исследовательская работа в заповедниках представляет собой необходимый элемент их деятельности, обеспечивающий эффективную реализацию охраняемыми территориями своей основной функции – сохранения природных комплексов и биологического разнообразия.

Участники конференции считают необходимым шире внедрять в практику научных исследований в заповедниках изучение геохимических процессов охраняемых экосистем, сохранять территориальную целостность государственных природных заповедников и национальных парков ввиду их уникальности и высокой биологической ценности, регулярно проводить на охраняемых территориях учебные и производственные практики студентов и магистрантов биологического и экологического профиля для создания кадрового резерва.

Украшением конференции стала выставка фотографий д. б. н. А.А. Широких «Загадочные миксомицеты».

Второй день конференции традиционно был посвящён знакомству с уникальными природными объектами Кировской области. На этот раз участникам была предложена экскурсия на региональные памятники природы «Береснятский ботанико-геологический комплекс» и «Каменная стенка у б. д. Тяптичи», расположенные в границах регионального заказника «Пижемский». Здесь, на правом берегу р. Немды, выходят на поверхность пермские рифовые известняки, образуя настоящие отвесные скалы, расщелины и каменистые осыпи, на которых сохранились скально-степные группировки реликтовых видов растений, значительная часть которых занесена в Красную книгу Кировской области.

Участники выражают глубокую благодарность коллективу заповедника «Нургуш» за высокое качество организации и эффективность работы конференции.

**VI Всероссийский научно-практический форум  
«Утилизация отходов производства и потребления:  
инновационные подходы и технологии»: итоги работы**

© 2024. Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

М. Л. Сазанова<sup>2</sup>, к. б. н., н. с.,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

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

e-mail: ecolab2@gmail.com

**Results of the VI All-Russian scientific and practical forum  
“Production and consumption waste utilization:  
Innovative approaches and technologies”**

© 2024. T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047

M. L. Sazanova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3492-8395

<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>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: ecolab2@gmail.com

Традиционно 18–19 ноября 2024 г. в рамках VI Всероссийского научно-практического форума «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии» в Вятском государственном университете (ВятГУ) учёные и сотрудники научно-исследовательских центров и ведущих вузов, а также профильных промышленных предприятий, обсудили инновационные подходы и технологии в области обращения с промышленными отходами производства и потребления и выстраиваемой в России комплексной системы рециклинга, а также проблемы экологического мониторинга окружающей среды. Организаторами форума выступили ВятГУ, ФГУП «ФЭО», Информационный центр по атомной энергии г. Кирова, Федеральный научно-образовательный Консорциум «Передовые ЭкоТехнологии», РХТУ им. Д.И. Менделеева, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН.

Программа форума включала следующие мероприятия:

1. VI Всероссийский молодёжный конкурс научно-исследовательских работ «Защита окружающей среды от загрязнения, рециклинг и рациональная утилизация отходов».

2. Интеллектуальная игра «Zero Waste».

3. VI Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии переработки отходов с получением новой продукции». Пленарная сессия «Рециклинг промышленных отходов в России: проблемы и перспективы».

4. XXII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем».

5. Дискуссия «Анализ современных технологий по переработке отходов, подпадающих под действие Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях».

6. Круглый стол: «Менделеевские классы: проблемы и перспективы».

География участников форума расширяется с каждым годом. В этом году было заслушано 92 очных доклада. Материалы поданы от учёных из 68 вузов и НИИ из 37 населённых

пунктов Российской Федерации, Республики Беларусь, Республики Молдовы, Республики Узбекистан. В мероприятиях форума приняли участие 406 человек. От ФГУП «ФЭО» в форуме приняли участие Е.М. Карунская – начальник отдела коммуникаций, А.Н. Громова – руководитель пресс-службы, О.В. Арнаутова – начальник отдела коммуникаций АО Росатом Экологический интегратор, А.Г. Свирский – директор филиала «Экотехнопарк «Мирный».

Работа форума началась 18 ноября с проведения очного этапа VI Всероссийского молодёжного конкурса научно-исследовательских работ «Защита окружающей среды от загрязнения, рециклинг и рациональная утилизация отходов». Конкурсная комиссия оценила 29 докладов от участников из 6 регионов России. Победители конкурса были награждены дипломами и памятными призами Министерства охраны окружающей среды Кировской области, Вятской торгово-промышленной палаты (ВТТП), Общественной Палаты Кировской области, Акционерного общества «Куприт», Вятского государственного университета.

Одновременно с конкурсом молодёжных проектов в первый день форума состоялась интеллектуальная игра «Zero Waste», посвящённая вопросам обращения с отходами производства, новым условиям работы с отходами I и II классов опасности и выстраиванию комплексной системы рециклинга в России. Участники игры – студенты из пяти вузов, входящих в Консорциум «Передовые ЭкоТехнологии».

В рамках Всероссийского экологического форума в этот же день состоялось открытие VI Всероссийской научно-практической конференции «Технологии переработки отходов с получением новой продукции». Пленарную секцию конференции открыл проректор по науке и инновациям ВятГУ С.Г. Литвинец. С приветственным словом выступили заместитель Председателя Правительства Кировской области Ю.И. Терешков, министр охраны окружающей среды Кировской области Т.Э. Абашев, заместитель председателя Общественной палаты Кировской области В.В. Савиных, вице-президент Союза «Вятская торгово-промышленная палата» Л.И. Перминов, советник генерального директора АО «Куприт» В.П. Пересторонин.

С пленарными докладами выступили учёные из НИИ и вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Перми, Саратова, Сыктывкара, Ижевска и Кирова. В частности, директор

филиала «Экотехнопарк» «Мирный» ФГУП «ФЭО» А.Г. Свирский сделал доклад о реализации проектов Госкорпорации «Росатом» в сфере экологии. Е.И. Тихомирова, профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., представила доклад об уже разработанных инновационных технологиях и технических решениях для получения высокотехнологичной продукции из отходов деятельности экотехнопарков ФГУП «ФЭО». Особый интерес вызвал доклад В.А. Сысуева, академика РАН, научного руководителя ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров): «Озимая рожь – основа здоровья населения и продовольственной независимости России». Академик подчеркнул многофункциональное универсальное назначение ржи, в т. ч. для оздоровления нации, отметил существующую неэффективность использования почвенно-климатических ресурсов многих российских регионов, необходимость разработки механизмов стимулирования производства ржаного зерна и пересмотра «дискриминационной» ценовой политики в отношении данной культуры.

В рамках пленарной сессии состоялась дискуссия «Анализ современных технологий по переработке отходов, подпадающих под действие Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях», в которой приняли участие учёные и профильные специалисты из Москвы, Кирова, Саратова, Сыктывкара, Ижевска, Перми, сотрудники ФГУП ФЭО (Москва). Участниками дискуссии выдвинут ряд предложений о мерах и мероприятиях по снижению влияния стойких органических загрязнителей на здоровье и используемых технологиях уничтожения стойких органических загрязнителей.

19 ноября в рамках данной конференции проведены 5 секционных заседаний: «Методы и технологии переработки отходов с получением новой продукции», «Биотехнологии утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления», «Технологии переработки и рециклинг органических и неорганических отходов», «Системы обеспечения экологической безопасности техногенных территорий», «Организационно-правовые и социальные аспекты обращения с отходами».

18–19 ноября проведены пленарное и секционные заседания XXII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». С пленарными докладами выступили:

д. б. н., в. н. с. Е.В. Шамрикова и д. б. н., в. н. с. Е.Д. Лодыгин (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН); к. с.-х. н., зам. директора по науке Е.В. Лыскова (Фалёнская селекционная станция ФАНЦ Северо-Востока); к. б. н., заведующий кафедрой экологии и экспериментальной биологии Т.В. Дрозденко (Псковский государственный университет); к. т. н., доцент М.Ю. Андрианова (Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого); д. т. н., профессор, г. н. с. лаборатории биомониторинга Т.Я. Ашихмина (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ); к. б. н., заведующий кафедрой ботаники и экологии А.И. Сафонов (Донецкий государственный университет). На данной конференции работали секции: «Экологический мониторинг природных и природно-техногенных систем. Методы исследования», «Методы биодиагностики в оценке качества окружающей среды», «Химия

и экология почв», «Экология микроорганизмов, растений и животных и их значение в оценке состояния окружающей среды».

Программа конференции (<http://envjournal.ru/ecolab/sbor/2420.pdf>) выполнена в полном объёме, все заявленные доклады состоялись. Традиционно, участники конференции отметили высокий уровень организации конференции, доброжелательную обстановку, которая способствует продуктивной работе. Доклады, представленные на конференции, имеют важное практическое значение, а представленные разработки могут служить основой для решения проблемы переработки отходов с получением новой продукции.

По итогам работы Форума опубликованы материалы в сборниках конференций и размещены на сайте: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>.

## Реализация научно-исследовательского потенциала молодёжи в конкурсной деятельности

© 2024. Н. В. Сырчина<sup>1</sup>, к. х. н., с. н. с.,

Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

<sup>1</sup>Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,

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

e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

## Realization of research potential of young people in science competition

© 2024. N. V. Syrchina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760<sup>3</sup>

T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>2</sup>Institute of Biology of the Komi Science Centre of the  
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: nvms1956@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Инновационное развитие российской экономики невозможно без активного формирования молодёжного кадрового резерва, обладающего необходимым набором профес-

сиональных и интеллектуально-творческих компетенций, позволяющих решать широкий круг возникающих проблем, обеспечивать успешную адаптацию к изменяющимся

условиям и высокую конкурентоспособность на внутреннем и внешних рынках. Важным фактором становления инновационных компетенций у молодёжи является конкурсная деятельность. Подготовка и защита конкурсной работы расширяет горизонты образовательной программы, способствует развитию креативности, предприимчивости, критического мышления, умения работать в команде и побеждать в конкурентной среде. Участие в конкурсе формирует культуру научного поиска, повышает самооценку, профессиональный уровень и социальную ответственность личности.

В ноябре 2024 г. в рамках стратегии развития университета и VI Всероссийского научного форума «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии» прошёл VI Всероссийский молодёжный конкурс научно-исследовательских работ «Защита окружающей среды от загрязнения, рециклинг и рациональная утилизация отходов».

Конкурс проходил в 2 этапа. На первом (отборочном) этапе жюри заочно рассматривало соответствие работ требованиям и критериям конкурса, на втором заслушивало доклады конкурсантов и оценивало качество и значимость защищаемых работ. Отборочный этап прошло и было допущено к защите 29 работ в шести номинациях: «Охрана окружающей среды от загрязнения»; «Отходы промышленности и сельского хозяйства как вторичные сырьевые ресурсы»; «Сбор и переработка бытовых отходов: инновационные подходы и решения»; «Цифровые технологии и роботизированные системы в сфере защиты окружающей среды от загрязнения и обращения с отходами»; «Экологический мониторинг». География участников включала г. Киров и Кировскую область, Москву, Саратов, Волгоград, Казань, Пермский край. Больше всего работ поступило от студентов вузов (52%) и учащихся средних школ (24%).

Высокую оценку жюри получили такие работы как «Совершенствование технологии и технических средств очистки сточных вод урбанизированных центров (на примере г. Саратова)», автор Н.Д. Проказов, аспирант СГТУ имени Гагарина Ю.А., научный руководитель О.В. Атаманова; «Способы переработки отхода молочной промышленности в органи-

неральные удобрения» автор Д.В. Петухов, доцент ВятГУ; «Экологический мониторинг загрязнения окружающей среды штаммами антибиотикорезистентных микроорганизмов в г. Кирове и на прилегающих территориях», авторы М.А. Виноградова, А.М. Григорьева, А.А. Танатарова, студенты КГМУ, научный руководитель В.А. Козвонин; «Описторхоз человека как природно-очаговый зооноз», авторы М.А. Липатников, А.А. Шаповалов, студенты ВятГАТУ, научные руководители О.В. Бякова, Л.В. Пилип; «Разработка и внедрение современных экологических практик по утилизации ливневых вод как часть экодевелопмента территории кампуса», автор А.А. Рылова, студентка ВятГУ, научный руководитель Т.А. Мусихина.

Большой интерес вызвали результаты исследований ученицы школы № 14 г. Кирова С.А. Кропачевой на тему «Отношение населения г. Кирова к проблеме раздельного сбора коммунальных отходов», выполненные под руководством д. т. н., профессора Т.Я. Ашихминой. Проведённые исследования позволили более чётко определить основные направления работы, которые, по мнению жителей, могут улучшить ситуацию со сбором и переработкой коммунальных отходов. Следует отметить, что все представленные на конкурс работы школьников отличались глубокой проработкой выбранной темы и высоким качеством презентации докладов. Конкурсанты свободно ориентировались в предмете исследований и чётко отвечали на задаваемые вопросы. Работами школьников руководили преподаватели вузов или научные сотрудники НИИ. Мы считаем, что такая система взаимодействия школ и вузов является важным фактором выявления, поддержки и привлечения талантливых детей к проектной и исследовательской деятельности.

В каждой представленной на конкурс работе были отмечены сильные стороны и моменты, требующие уточнения и доработки. Проявленная членами жюри искренняя заинтересованность в полученных конкурсантами результатах является важным фактором стимулирования научно-исследовательской деятельности молодёжи в выбранной профессиональной сфере.

# VI Всероссийский научно-практический форум «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии»



Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004