



2023

*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**

**РЕМЕДИАЦИЯ И  
РЕКУЛЬТИВАЦИЯ**

**ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ**

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ  
ЭКОЛОГИЯ**

**ЭКОЛОГИЯ И КЛИМАТ**

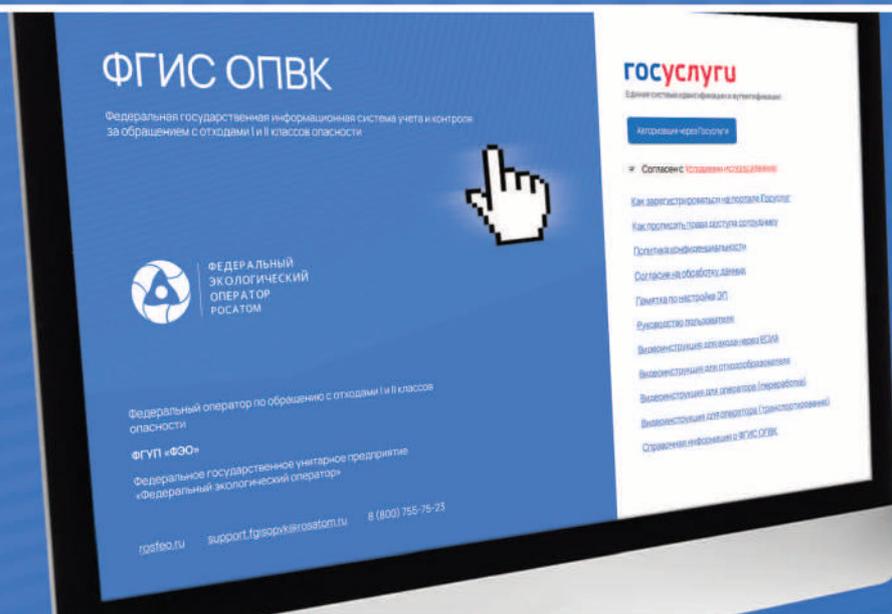
**СОЦИАЛЬНАЯ  
ЭКОЛОГИЯ**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

<http://envjournal.ru>

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОТХОДОВ

# Федеральная государственная информационная система учета и контроля за обращением с отходами I и II классов



Для работы обязательна регистрация  
во ФГИС ОПВК



<https://gisopvk.ru/login>

## УЧАСТНИКИ:

- Федеральный экологический оператор
- Росприроднадзор
- юрлица и ИП, образующие отходы I и II классов
- операторы по переработке
- операторы по транспортированию
- региональные операторы ТКО

## ФУНКЦИОНАЛ:

- оказание услуги в формате «одного окна»
- учет и контроль в режиме реального времени
- прогнозирование загрузки мощностей
- оптимизация логистики
- выявление нарушений

Круглосуточная служба технической поддержки:  
**8 (800) 755-75-23**



ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ  
ОПЕРАТОР  
РОСАТОМ

[www.rosfeo.ru](http://www.rosfeo.ru)





# Теоретическая и прикладная ЭКОЛОГИЯ

№ 4, 2023  
<http://envjournal.ru>

Журнал включён в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук (№ 2514 по состоянию на 24.10.2023).

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

Журнал издаётся с 2007 года.

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

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

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

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

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

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

**Ответственный секретарь 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,  
**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,  
администратор сайта журнала – Вячеслав Рутман,  
выпускающий редактор – Мария Зелаева.  
Директор издательства «О-Краткое» Евгений Дрогов  
© Оформление. Издательство «О-Краткое»

Дата выхода номера: 18.12.2023.  
Тираж 1000 экз. Заказ № 3006. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Кировская областная типография».  
Адрес типографии: 610004, Кировская область,  
г. Киров, ул. Ленина, 2в

## 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. Лаженцев** 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 Цзилинского аграрного университета
- С.Г. Литвинцев** к.с.-х.н., доцент, проректор по науке и инновациям  
Вятского государственного университета
- В.А. Малинников** д.т.н., профессор, профессор Московского государст-  
венного университета геодезии и картографии
- 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. Ширияев** д.б.н., с.н.с., в.н.с. ВНИИ охотничьего хозяйства  
и звероводства им. проф. Б.М. Житкова
- В.Т. Юнгблуд** д.и.н., профессор, президент  
Вятского государственного университета



# Theoretical and Applied ECOLOGY

No. 4, 2023

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

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

The journal is published since 2007.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Technical Secretaries:**

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

Senior Researcher of Vyatka State University,

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

The articles are reviewed. Reprint without permission of the publisher is prohibited, links to the journal are obligatory when citing.

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

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

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

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

To effect subscription it is necessary to address to one of the partners of JSC "MK-Periodica" in your country or to JSC "MK-Periodica" directly.  
Address: 39 Gilyarovskiy St., Moscow, Russia, 129110.  
Tel: (495) 281-91-37, 281-97-63, Fax: (495) 281-37-98  
E-mail address: info@periodicals.ru. <http://www.periodicals.ru>

Publisher: the publishing house of "O-Kratkoe"  
Publisher's Address: 67 Svobody St., Kirov region, Russia, Kirov, 610020. E-mail: okrat@okrat.ru.

Designer – Tatiana Korshunova. Translation – Grigoriy Kantor, Mariya Sazanova. Administrator of Web site – Vyacheslav Rutman. Managing editor – Mariya Zelayeva. Director of the publishing house "O-Kratkoe" – Evgeniy Drogov.  
© Publishing house "O-Kratkoe".

Release date: December 18, 2023.  
Circulation 1000 copies. Order No. 3006. Free price.

"Kirov regional printing house", LTD.  
Printing Address: 2b Lenin St., Kirov, Kirov region, Russia, 610004

## 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

- С. В. Райкова, Ю. С. Пусев, С. И. Мазилев, М. В. Поздняков, Н. Е. Комлева, А. Н. Микеров* Влияние поллютантов атмосферного воздуха на здоровье человека (обзор) .....6
- О. В. Колотова, Е. Э. Нефедьева, И. Р. Грибуст, Е. А. Сухова, Е. А. Звада, В. В. Шевелёва* Применение микробных биотехнологий для устранения в почве остатков гербицидов классов имидазолинонов и сульфонилмочевин (обзор) ..... 16

## СТАТЬИ

- А. С. Петрова* Реализация экологических проектов Госкорпорацией «Росатом» .....28
- Н. М. Макарова, А. Л. Балашов, А. М. Тойгильдин, А. Г. Свирский* Особенности создания систем автоматического контроля загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов .....35
- М. А. Шумилова, Н. Е. Суксин* Кинетические характеристики процесса регенерационной утилизации отработанного раствора химического никелирования .....44
- П. Ш. Сайранова, Е. А. Хайрулина, Н. В. Митракова, Н. В. Порошина* Моделирование как прогноз трансформации почв при техногенном засолении .....52
- Д. В. Тарабукин, Е. Н. Патова, И. В. Новаковская* Новый гидрогелевый комплекс с иммобилизованными клетками микроводорослей для удаления аммоний и фосфат-ионов из сточных вод .....61
- Ю. А. Тунакова, С. В. Новикова, В. С. Валиев, Е. В. Байбакова* Развитие методики расчёта нормативов допустимого сброса жидких производственных отходов с учётом региональных особенностей водных объектов .....70
- A. V. Vasilyev* Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields as an object of ecological risk .....78
- В. В. Семёнов, В. И. Жданов, И. А. Синоков, М. В. Графкина* Термическая утилизация отработанных масел .....85
- Т. И. Ширшова, И. В. Бешлей, К. Г. Уфимцев* Комплексные исследования содержания биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов, образующихся при длительном хранении .....91
- T. G. Korotkova, A. M. Zakolyukina, S. A. Bushumov* Study of the efficiency of water treatment from ammonium ions by a calcined sorbent from ash-and-slag waste .....99
- С. Л. Фукс, С. В. Девятерикова* Использование отходов производств для сорбции токсичных газов .....110
- А. А. Чугайнова, Л. В. Рудакова* Механизм биосорбции металлов из электронных отходов микроскопическими водорослями .....118
- В. А. Бродский, А. В. Перфильева, Ю. О. Малькова, А. В. Колесников, Н. М. Макарова* Технологические решения и опыт промышленной переработки жидких хромсодержащих отходов ...125
- И. А. Почиталкина, И. М. Костанов, И. Б. Сибирякова* Повышение качества и расширение ассортимента продуктов на основе технического монокальцийфосфата ..... 135
- Ю. Н. Курбатов, Т. А. Трифонова* Исследование интегральной токсичности почвы, загрязнённой нефтепродуктами .....141
- Н. В. Сырчина, С. Г. Скугорева, Т. И. Кутявина* Рациональная утилизация серосодержащих отходов .....151

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ПРОБЛЕМЫ  
ЭКОЛОГИИ

МЕТОДОЛОГИЯ  
И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ.  
МОДЕЛИ  
И ПРОГНОЗЫ

МОНИТОРИНГ  
ПРИРОДНЫХ  
И АНТРОПОГЕННО  
НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ  
ЭКОЛОГИЗАЦИЯ  
ПРОИЗВОДСТВА

ЭКОТОКСИКОЛОГИЯ

АГРОЭКОЛОГИЯ

**АГРОЭКОЛОГИЯ**

- Т. С. Дроганова, Л. В. Поликарпова, М. А. Севостьянов, А. А. Мазуркевич* Оценка применимости почвогрунтов, произведённых из твёрдых отходов для выращивания лекарственных растений .....157
- П. Н. Балабко, Е. М. Лаптева, А. А. Снег* Диагностика процессов почвообразования в аллювиальных луговых почвах речных долин таёжно-лесной и степной зон .....165

**ПОПУЛЯЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ**

- И. Г. Широких, Н. А. Бокков, Е. В. Дабах, Л. В. Кондакова, Т. Я. Ашихмина* Разнообразие актинобактериальных сообществ в местах захоронения жидких отходов химического предприятия .....174
- Л. В. Кондакова, Н. В. Сырчина, Т. Я. Ашихмина, И. А. Кондакова* Трансформация почвенной альгоцианофлоры под влиянием фосфоритов Верхнекамских бедных.....184

**СОЦИАЛЬНАЯ ЭКОЛОГИЯ**

- В. В. Вагин, В. А. Паксиваткина* Экологические проекты инициативного бюджетирования .....191
- Е. S. Koshcheeva, M. A. Smirnov* Environmental safety through the prism of legal regulation of renewable energy in Russia .....199
- Н. Г. Гаджиев, С. А. Коноваленко, М. Н. Трофимов* Обеспечение энергетической безопасности России в условиях перехода к зелёному курсу экономики .....208
- Б. И. Кочуров, М. Ю. Глуховская, М. Ю. Гарицкая, Т. А. Евстифеева* О методических подходах к определению углеродного следа .....216
- Е. В. Каранина, В. Н. Пугач, К. Е. Картавых* Анализ эколого-экономической эффективности функционирования регионов Приволжского федерального округа .....225

**ИНФОРМАЦИЯ**

- Хейн Тху Аунг, Д. О. Лемешев, А. В. Моржухин, А. В. Колесников, В. А. Бродский, И. В. Ерёмин* Сотрудничество России и Мьянмы в области подготовки национальных кадров в высших учебных заведениях .....235
- К юбилею Татьяны Анатольевны Трифоновой* .....238
- Т. Я. Ашихмина, М. Л. Сазанова* Экологический форум в г. Кирове .....240
- А. Н. Громова* «Менделеевская экосистема» расширяет горизонты .....241

**CONTENTS****REVIEWS**

- S. V. Raikova, Yu. S. Gusev, S. I. Mazilov, M. V. Pozdnyakov, N. E. Komleva, A. N. Mikerov* Effects of atmospheric air pollutants on human health (overview) .....6
- O. V. Kolotova, E. E. Nefedieva, I. R. Gribust, E. A. Sukhova, E. A. Zvada, V. V. Sheveleva* Application of microbial biotechnologies to eliminate residues of herbicides of imidazolinone and sulfonyleurea classes in soil (review) .....16

**ARTICLES****THEORETICAL PROBLEMS OF ECOLOGY****METHODOLOGY AND RESEARCH METHODS. MODELS AND FORECASTS**

- A. S. Petrova* Implementation of environmental projects by Rosatom State Corporation .....28
- N. M. Makarova, A. L. Balashov, A. M. Toygildin, A. G. Svirskiy* Features of creating systems for automatic control of pollutants from stationary sources of emission .....35
- M. A. Shumilova, N. E. Suksin* Kinetic characteristics of the regenerative utilization process of the spent solution after chemical nickel plating .....44
- P. Sh. Sairanova, E. A. Khayrulina, N. V. Mitrakova, N. V. Poroshina* Modeling as a tool for soil transformation forecasting under technogenic salinization .....52
- D. V. Tarabukin, E. N. Patova, I. V. Novakovskaya* New hydrogel complex with immobilized microalgae cells for removal ammonium and phosphate ions from wastewater .....61
- Y. A. Tunakova, S. V. Novikova, V. S. Valiev, E. V. Baibakova* Development of the methodology for calculating the standards of permissible discharge of liquid industrial wastes taking into account regional peculiarities of water bodies .....70

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

**ECOLOGIZATION  
OF PRODUCTION**

**ECOTOXICOLOGY**

**AGROECOLOGY**

**POPULATION  
ECOLOGY**

**SOCIAL ECOLOGY**

**INFORMATION**

<i>A. V. Vasilyev</i> Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields as an object of ecological risk .....	78
<i>V. V. Semenov, V. I. Zhdanov, I. A. Sinyukov, M. V. Grafkina</i> Thermal disposal of waste oils .....	85
<i>T. I. Shirshova, I. V. Beshley, K. G. Ufimtsev</i> Comprehensive study of the content of biologically active substances in the destruction products of bark-wood waste generated during long-term storage .....	91
<i>T. G. Korotkova, A. M. Zakolyukina, S. A. Bushumov</i> Study of the efficiency of water treatment from ammonium ions by a calcined sorbent from ash-and-slag waste .....	99
<i>S. L. Fuks, S. V. Devyaterikova</i> Utilization of industrial wastes for sorption of toxic gases .....	110
<i>A. A. Chugainova, L. V. Rudakova</i> Mechanism of biosorption of metals from e-waste by microscopic algae .....	118
<i>V. A. Brodskiy, A. V. Perfilova, Yu. O. Malkova, A. V. Kolesnikov, N. M. Makarova</i> Technological solutions and experience of industrial processing of liquid chromium-containing waste .....	125
<i>I. A. Pochitalkina, I. M. Kostanov, I. B. Sibiryakova</i> The quality improvement and products expansion on technical monocalcium phosphate base .....	135
<i>Yu. N. Kurbatov, T. A. Trifonova</i> The study of the integral toxicity of oil-contaminated soil .....	141
<i>N. V. Syrchina, S. G. Skugoreva, T. I. Kutyavina</i> Rational disposal of sulfur-containing waste .....	151
<i>T. S. Droganova, L. V. Polikarpova, M. A. Sevostyanov, A. A. Mazurkevich</i> Assessment of the possibility of using solid waste compost for growing medicinal plants .....	157
<i>P. N. Balabko, E. M. Lapteva, A. A. Sneg</i> Diagnostics of soil formation processes in alluvial meadow soils of river valleys in taiga-forest and steppe zones .....	165
<i>I. G. Shirokikh, N. A. Bokov, E. V. Dabakh, L. V. Kondakova, T. Ya. Ashikhmina</i> Diversity of active bacterial communities in the disposal sites of liquid waste of a chemical enterprise .....	174
<i>L. V. Kondakova, N. V. Syrchina, T. Ya. Ashikhmina, I. A. Kondakova</i> Transformation of soil algocyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites .....	184
<i>V. V. Vagin, V. A. Paksivatkina</i> Ecological initiative budgeting projects .....	191
<i>E. S. Koshcheeva, M. A. Smirnov</i> Environmental safety through the prism of legal regulation of renewable energy in Russia .....	199
<i>N. G. Gadzhiev, S. A. Konovalenko, M. N. Trofimov</i> Ensuring Russia's energy security in the context of the transition to a green economy .....	208
<i>B. I. Kochurov, M. Yu. Glukhovskaya, M. Yu. Garitskaya, T. A. Evstifeeva</i> On methodological approaches to determining the carbon footprint .....	216
<i>E. V. Karanina, V. N. Pugach, K. E. Kartavykh</i> Analysis of the ecological and economic efficiency of the functioning of the regions of the Volga Federal District .....	225
<i>Hein Thu Aung, D. O. Lemeshev, A. V. Morzhukhin, A. V. Kolesnikov, V. A. Brodsky, I. V. Eremin</i> Russian-Myanmar cooperation in training national personnel in higher education institutions .....	235
<i>On the Anniversary of Tatyana Trifonova</i> .....	238
<i>T. Ya. Ashikhmina, M. L. Sazanova</i> Ecological Forum in Kirov .....	240
<i>A. N. Gromova</i> "Mendeleev Ecosystem" expands horizons .....	241

## Влияние поллютантов атмосферного воздуха на здоровье человека (обзор)

© 2023. С. В. Райкова<sup>1,2</sup>, к. м. н., с. н. с., Ю. С. Гусев<sup>1</sup>, к. б. н., с. н. с.,  
С. И. Мазиллов<sup>1</sup>, к. б. н., м. н. с., М. В. Поздняков<sup>1,2</sup>, к. ф.-м. н., с. н. с.,  
Н. Е. Комлева<sup>1,2</sup>, д. м. н., зам. руководителя по научной работе,  
А. Н. Микеров<sup>1,2</sup>, д. б. н., руководитель,

<sup>1</sup>Саратовский МНЦ гигиены ФБУН «ФНЦ медико-профилактических технологий  
управления рисками здоровью населения»,

410022, Россия, г. Саратов, ул. Заречная, д. 1А,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный медицинский университет  
имени В.И. Разумовского» Минздрава России,

410012, Россия, г. Саратов, ул. Большая Казачья, д. 112,

e-mail: matiz853@yandex.ru

Одной из глобальных проблем современного человечества является загрязнение атмосферного воздуха, которое оказывает влияние не только на изменение климатических условий среды обитания, но и вносит существенный вклад в формирование нарушений здоровья населения. В статье приведён обзор современных данных о влиянии приоритетных загрязнителей атмосферного воздуха на здоровье человека, представленных в базах данных научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Web of Science, Scopus и PubMed, (2017–2022 гг.). Выявлено, что наиболее исследованными загрязнителями атмосферного воздуха в контексте влияния на здоровье человека являются взвешенные частицы диаметром 2,5 мкм и менее, взвешенные частицы диаметром 10 мкм и менее, диоксид азота. Однако, в последнее время отмечается рост интереса к вопросу влияния приземного озона на состояние здоровья. Несмотря на то, что большинство работ были посвящены изучению влияния поллютантов на дыхательную и сердечно-сосудистую системы, в последние годы вектор научных интересов смещается в сторону определения возможной роли поллютантов в формировании ментальных расстройств, патологий центральной нервной и эндокринной систем, репродуктивной функции. Представлены данные о связи продолжительного воздействия диоксида азота, взвешенных частиц диаметром 2,5 мкм и менее, монооксида углерода и озона с увеличением заболеваемости и смертности от SARS-CoV-2. Установлено, что длительное воздействие поллютантов при концентрациях значительно ниже текущих современных стандартов оказывает существенное негативное влияние на здоровье как взрослого, так и детского населения, что диктует необходимость продолжения исследований в данном направлении с целью решения вопроса о возможной коррекции современных стандартов качества воздуха.

**Ключевые слова:** поллютанты, атмосферный воздух, здоровье человека, заболеваемость.

## Effects of atmospheric air pollutants on human health (overview)

© 2023. S. V. Raikova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0001-5749-2382, Yu. S. Gusev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7379-484X,  
S. I. Mazilov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8220-145X, M. V. Pozdnyakov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2067-3830,  
N. E. Komleva<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0001-5360-712X, A. N. Mikerov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-0670-7918

<sup>1</sup>Saratov Hygiene Medical Research Center of the FBSI  
“FSC Medical and Preventive Health Risk Management Technologies”,  
1A, Zarechnaya St., Saratov, Russia, 410022,

<sup>2</sup>Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky of Minzdrav of Russia,  
112, Bolshaya Kazachya St., Saratov, Russia, 410012,

e-mail: matiz853@yandex.ru

One of modern humanity's global scourges is air pollution on account not only of its influence on climate change but also its significant impact on public health. A review of current data on the effects of priority atmospheric air pollutants on human health was carried out. The search was performed using eLIBRARY.RU, Web of Science, Scopus and PubMed, in a time span of 2017–2022. Particulate matter (with a diameter of 2.5 μm (PM<sub>2.5</sub>) or less and 10 μm (PM<sub>10</sub>) or less) and

nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) were the most widely investigated pollutants in the context of health effects. Recently, however, there has been growing interest in the health effects of ozone. Despite the fact that most of the works were devoted to the study of the influence of pollutants on the respiratory and cardiovascular systems, recently the vector of scientific interests shifted to determine the possible role of pollutants in the formation of mental disorders, pathologies of central nervous and endocrine systems, reproductive function. Data on the association of prolonged exposure to nitrogen dioxide, PM<sub>2.5</sub>, carbon monoxide and ozone with increased morbidity and mortality from SARS-CoV-2 were provided. Prolonged exposure to concentrations well below current standards has been found to have a significant negative impact on the health of both adults and children. Further research in this area is needed to address the possible correction of modern air quality standards.

**Keywords:** pollutants, atmospheric air, human health, morbidity.

Одной из глобальных проблем современного человечества является загрязнение атмосферного воздуха, которое оказывает влияние не только на изменение климатических условий среды обитания, но и вносит существенный вклад в формирование нарушений здоровья населения [1, 2]. По данным ВОЗ (2019 г.), 99% мирового населения дышит загрязнённым воздухом, что ежегодно приводит к 4,2 млн случаев преждевременных смертельных исходов от ишемической болезни сердца и инсульта, хронической обструктивной болезни лёгких, острых инфекций нижних дыхательных путей, онкологических заболеваний дыхательных путей, обусловленных воздействием поллютантов, содержащихся в атмосферном воздухе [3]. С развитием урбанизации и индустриализации проблема загрязнения воздуха становится всё более серьёзной, вследствие увеличения выбросов транспортных средств, промышленных предприятий, которые являются основными источниками загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных городах [4].

Одной из наименее адаптированной к негативному воздействию загрязнителей атмосферного воздуха категорией лиц является детское население [5, 6]. Основными загрязнителями воздуха являются взвешенные частицы (смесь твёрдых частиц и мелких капель, образующаяся, в основном, в результате сжигания топлива и движения транспорта); диоксид азота (NO<sub>2</sub>), образующийся в результате движения транспорта и использования газовых плит внутри помещений; диоксид серы (SO<sub>2</sub>), образующийся в результате сжигания ископаемых видов топлива; озон (O<sub>3</sub>), образующийся в результате воздействия ультрафиолетовых лучей на кислород воздуха.

Последнее десятилетие ознаменовалось повышением публикационной активности по проблемам загрязнения воздуха и возможных негативных последствий для здоровья человека. Начиная с 2004 г. появился новый подход к анализу проблемы путём проведе-

ния систематических обзоров и метаанализов публикаций [7]. Наиболее активное участие в изучении данной проблемы принимают научные организации Китайской Народной Республики, США, ряда стран Западной Европы, Индии [8].

В статье представлен обзор современных литературных данных о влиянии поллютантов атмосферного воздуха на здоровье человека.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования является обзор публикаций по влиянию загрязнителей атмосферного воздуха на здоровье человека. В обзоре использованы литературные источники 2017–2022 гг. из баз данных научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU, Web of Science, Scopus и PubMed. Используются следующие поисковые термины и их комбинации: «загрязнение воздуха», «здоровье человека», «качество воздуха», «эпидемиология», «смертность», «здоровье», «риск для здоровья», «оценка риска», «воздействие на здоровье», «диоксид азота», «диоксид серы», «оксид углерода», «озон», «взвешенные частицы», «air pollution», «human health», «air quality», «epidemiology», «mortality», «health», «health risk», «risk assessment», «health effects», «exposure», «nitrogen dioxide», «sulfur dioxide», «carbon monoxide», «ozone», «particulate matter», «PM<sub>2.5</sub>», «PM<sub>10</sub>».

Найденную информацию анализировали и систематизировали в соответствии с заявленными разделами статьи.

### Влияние загрязнения атмосферного воздуха на здоровье человека

При анализе публикаций отмечено, что большинство исследований посвящены изучению влияния поллютантов на дыхательную и сердечно-сосудистую системы. Респираторные заболевания, вызванные загрязнением воздуха, в большей степени изучены у детей,

а обзоры сердечно-сосудистых заболеваний сосредоточены на всех возрастах. Наиболее изученным загрязнителем атмосферного воздуха являются мелкие взвешенные частицы – РМ (от англ. Particulate Matter). Частицы диаметром 10 мкм и менее ( $PM_{10}$ ) могут проникать и оседать глубоко в лёгких, но более опасными для здоровья являются частицы диаметром 2,5 мкм и менее ( $PM_{2.5}$ ), которые могут проникать в лёгкие и кровеносную систему [9] и оказывать наиболее серьёзное влияние на здоровье человека [40]. Установлено, что длительное воздействие  $PM_{2.5}$  сопровождается повышенной смертностью в общей популяции [11–14], у пожилых людей [15] и у больных туберкулёзом [16]. Установлена связь между длительным воздействием  $PM_{2.5}$  в окружающей среде и увеличением смертности от хронической обструктивной болезни лёгких (ХОБЛ) на 12% [14, 17]. Метаанализ данных из девяти европейских стран показал статистически значимую связь между воздействием взвешенных частиц и смертностью от рака лёгких [18–21]. В ряде исследований установлена связь длительной экспозиции  $PM_{2.5}$  и смертности от сердечно-сосудистой и цереброваскулярной патологии [12–14, 22, 23]. Высокие концентрации  $PM_{10}$  приводили к обострению респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний [24]. Доказано, что частота заболеваний системы кровообращения (ишемическая болезнь сердца, геморрагический инсульт, артериальная гипертензия, аритмия) увеличивается при длительном воздействии  $PM_{2.5}$  окружающей среды на организм человека [25–32]. Многочисленными исследованиями подтверждена связь между воздействием взвешенных частиц и тяжестью течения, частотой обострений и скоростью прогрессирования ХОБЛ [17, 33–35].

Имеются убедительные доказательства, подтверждающие связь между воздействием загрязнённого воздуха и развитием астмы, аллергических и обструктивных заболеваний верхних дыхательных путей у детей [36–38] и взрослых [39]. Развитие и обострение течения бронхиальной астмы, нарушение вентиляционной функции лёгких может быть вызвано воздействием различных атмосферных поллютантов:  $NO_2$  [40–45],  $SO_2$  [46], взвешенных частиц, преимущественно  $PM_{2.5}$  [47]. Доказано, что вдыхание высоких концентраций  $NO_2$  создаёт условия для развития респираторных заболеваний, которые сопровождаются кашлем, одышкой, бронхоспазмом, отёком лёгких [40].

Длительное воздействие  $PM_{2.5}$  может увеличить заболеваемость хроническими заболеваниями почек [48, 49], а у лиц с уже существующими заболеваниями приводит к увеличению смертности от почечной недостаточности [50]. Отмечен риск развития онкологических заболеваний, таких как носоглоточная карцинома [51], гепатоцеллюлярная карцинома [52]. Получены данные о корреляции между концентрациями  $PM_{2.5}$  и  $NO_2$  и обострением аллергического ринита у взрослых [53].

В последнее время пристальное внимание уделяется изучению влияния поллютантов атмосферного воздуха на психологические и социальные аспекты жизни населения. Обнаружены данные о связи длительного воздействия  $PM_{2.5}$  с развитием когнитивных нарушений [54, 55], о возможных связях между воздействием  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  и развитием депрессии, суицидальными попытками [56–59]. Ряд исследователей пришли к выводу, что воздействие  $PM_{2.5}$  связано с риском развития деменции [60–62] – одного из наиболее часто встречаемых нейродегенеративных заболеваний [63], распространённость которого значительно возросла в последние годы [64]. Также установлена связь между повышенным риском развития деменции и воздействием оксидов азота, монооксида углерода (СО) [65], а повышенная концентрация  $NO_2$  летом ассоциировалась с ухудшением существующих депрессивных состояний [66].

В последнее время накапливается всё больше данных о роли поллютантов атмосферного воздуха в развитии эндокринных нарушений. Несмотря на то, что такие состояния, как метаболический синдром [67], дислипидемия [68], ожирение, высокий уровень глюкозы в крови натощак [67] и синдром поликистозных яичников [69] относительно мало изучены с точки зрения количества исследований, результаты последовательно подтверждают связь между данной патологией и длительным воздействием  $PM_{2.5}$ . Установлено, что увеличение концентраций  $PM_{2.5}$  коррелирует с увеличением заболеваемости сахарным диабетом II типа [70–73].

Воздействие  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  и  $NO_2$  во время беременности имеет ассоциации с более высоким риском преждевременных родов, низкой массой новорождённых [74–76]. Исследование, проведённое в Шанхае, показало, что воздействие загрязнителей атмосферного воздуха, в частности, повышенное содержание  $NO_2$ ,  $PM_{10}$ ,  $SO_2$  и  $O_3$  имеет ассоциативные связи с большим процентом неблагоприятных

исходов беременности у пациенток с экстракорпоральным оплодотворением [77].

Ряд исследований, представленных в обзоре [78], выявили связь между воздействием ряда поллютантов, особенно  $PM_{10}$ , а также возникновением и прогрессированием рассеянного склероза.

В связи с глобальной пандемией новой коронавирусной инфекции COVID-19 медицинское сообщество обратило внимание на возможную связь между течением заболевания и состоянием атмосферного воздуха. Получены данные, указывающие, что длительное воздействие  $NO_2$  может быть одним из наиболее важных факторов увеличения смертности от новой коронавирусной инфекции COVID-19 [79]. Исследование, проведённое в Лондоне, показало, что  $PM_{2.5}$ , CO и  $O_3$  имеют положительную связь с увеличением числа заболеваемости и смертности от SARS-CoV-2 [80].

Одним из основных газообразных загрязнителей в Китае и других развивающихся странах является  $SO_2$ . Приводятся данные о вкладе этого поллютанта в преждевременную смертность от ХОБЛ [81]. Выявлена связь между воздействием  $SO_2$  и риском заболеваний дыхательной системы [82, 83], госпитализацией при ишемическом инсульте в развивающихся странах [84]. Длительное сочетанное воздействие  $O_3$  и  $SO_2$  связано с более высоким риском развития сахарного диабета II типа у взрослых [85].

Незначительное количество публикаций сфокусированы непосредственно на воздействии только  $O_3$  на организм человека [86]. Показано, что кратковременное воздействие  $O_3$  повышает риск развития трахеита, бронхита и глаукомы [86], смертельных исходов у больных ХОБЛ, артериальной гипертонией, ишемической болезнью сердца и инсультом [87]. Длительное воздействие  $O_3$  является экологическим фактором риска развития сахарного диабета в Китае [88]. Доказано, что продолжительное воздействие  $O_3$  может влиять на функцию лёгких у детей и лиц пожилого возраста [89].

Многоцентровое исследование данных из 337 городов в 18 странах, включая более 40 миллионов смертельных случаев и охватывающие широкий круг населения из разных регионов мира, выявило значительную связь между кратковременным воздействием CO и ежедневной смертностью [90].

Загрязнение воздуха влияет на иммунную систему и связано с аллергическим ринитом, остеопорозом, болезнью сухого глаза, блефаритом, воспалительными заболеваниями кишечника, ускорением внутрисосудистого свёртывания крови, снижением скорости клубочковой фильтрации, старением кожи [91].

Основные негативные эффекты воздействия приоритетных поллютантов на здоровье человека приведены в таблице.

Таблица / Table

Негативные эффекты воздействия основных поллютантов атмосферного воздуха на здоровье человека  
Adverse effects of the main ambient air pollutants on human health

Поллютант / Pollutant	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$NO_2$	$SO_2$	$O_3$	CO
Заболевания сердечно-сосудистой системы / Cardiovascular disease	+	+	-	+	+	-
Заболевания органов дыхания Respiratory disease	+	+	+	+	+	-
Заболевания центральной нервной системы и психические нарушения Central nervous system diseases and mental disorders	+	+	+	-	-	+
Патологии эндокринной системы Endocrine system pathology	+	-	-	+	+	-
Нарушения репродуктивной функции Reproductive disorders	+	+	+	+	+	-
Онкологические заболевания Oncological diseases	+	-	+	-	-	-
Отягощение течения COVID-19 Complications of COVID-19	-	-	+	-	+	+

Примечание: «-» – связь не выявлена.  
Note: “-” – connection not found.

### Новейшие тенденции в изучении воздействия поллютантов атмосферного воздуха на здоровье человека

В последние годы отмечается смещение акцентов в проблеме изучения влияния загрязнителей атмосферного воздуха на здоровье человека, в частности, исследователи начали уделять внимание изучению возможной роли поллютантов в формировании деменции и когнитивных нарушений [61]. Несмотря на возрастающее количество публикаций по данной проблеме, количество систематических обзоров и метаанализов весьма ограничено [1], доказательства воздействия загрязнителей воздуха остаются сомнительными, поэтому требуются дальнейшие исследования, анализирующие влияние загрязнения воздуха на психические, психологические и социальные аспекты жизни человека. Отдельного внимания заслуживают публикации, освещающие влияние поллютантов на репродуктивное здоровье женщин (невынашивание беременности при экстракорпоральном оплодотворении, преждевременные роды, гипотрофия и другие нарушения развития плода). Однако данных о влиянии на репродуктивную функцию женщин и мужчин в настоящее время недостаточно [92], как и на другие нарушения в эндокринной системе, что требует дальнейших исследований в данном направлении.

В последние годы отмечается повышение интереса к вопросу влияния  $O_3$  атмосферного воздуха на состояние здоровья, что возможно, обусловлено сохранением воздействия повышенных концентраций приземного озона в странах юго-восточной Азии и Китае.

Одним из интересных направлений в изучении влияния загрязнённого атмосферного воздуха на здоровье человека является вклад в заболеваемость и смертность от инфекционных заболеваний. В условиях пандемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 интересным и перспективным направлением является выявление корреляции между уровнем загрязнения атмосферного воздуха и показателями заболеваемости и смертности от COVID-19, учитывая, что рядом авторов уже получены первые положительные результаты [79, 80].

В развитых странах, достигших определённых результатов по обеспечению безопасной внешней среды, в последнее время поднимается вопрос о надёжности принятых стандартов качества воздуха. В ряде исследований установлено, что длительное воздействие поллю-

тантов при концентрациях, значительно ниже текущих современных стандартов, оказывают существенные негативные последствия для здоровья как среди взрослого, так и детского населения [89, 93]. Таким образом, можно предположить, что действующие стандарты качества атмосферного воздуха недостаточно защищают население от вредных последствий воздействия поллютантов.

### Заключение

В данном обзоре представлены современные данные по проблеме влияния поллютантов атмосферного воздуха на различные органы и системы человека. Наиболее исследованными загрязнителями атмосферного воздуха в контексте влияния на здоровье человека являются  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ . Большинство опубликованных работ посвящены изучению влияния поллютантов на дыхательную и сердечно-сосудистую системы, однако в последние годы вектор научных интересов смещается в сторону определения возможной роли поллютантов в формировании психических расстройств, патологии центральной нервной и эндокринной систем, репродуктивной функции. Продолжительное воздействие  $NO_2$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO$  и  $O_3$  имеет положительную корреляционную связь с увеличением числа заболеваемости и смертности от SARS-CoV-2. Установлено, что длительное воздействие поллютантов при концентрациях значительно ниже текущих современных стандартов оказывает существенное негативное влияние на здоровье как взрослого, так и детского населения, что диктует необходимость продолжения исследований в данном направлении с целью решения вопроса о возможной коррекции современных стандартов качества воздуха.

Таким образом, важными и перспективными научными направлениями являются мониторинг состояния атмосферного воздуха, определение приоритетных загрязнителей, изучение их влияния на малоизученные аспекты здоровья человека, коррекция стандартов качества воздуха, разработка прогностических моделей по загрязнению воздуха и ассоциированными с ним заболеваемостью и смертностью населения.

### References

1. Dominski F.H., Branco J.H.L., Buonanno G., Stabile L., da Silva M.G., Andrade A. Effects of air pollution on health: A mapping review of systematic reviews and

- meta-analyses // *Environmental Research*. 2021. V. 201. Article No. 111487. doi: 10.1016/j.envres.2021.111487
2. Sanyal S., Rochereau T., Maesano C.N., Com-Ruelle L., Annesi-Maesano I. Long-term effect of outdoor air pollution on mortality and morbidity: a 12-year follow-up study for metropolitan France // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. V. 15 (11). Article No. 2487. doi: 10.3390/ijerph15112487
3. World Health Organisation – Ambient (outdoor) air pollution [Internet resource] [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (Accessed: 25.01.2023).
4. Krupnova T.G., Bulanova A.V., Makarovskikh T.A., Herreinstein A.V. Urban air pollution modeling: a critical review // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 27–33. doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-027-033
5. Trifonova T.A., Martsev A.A., Selivanov O.G. Gas-air emissions from glass container production as a risk factor for public health // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 155–161 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-155-161
6. Kalinin S.I., Toropova S.I. Statistical methods for analyzing the correlation between air quality and the state of children's health in the Kirov region // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 2. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-143-148
7. Ioannidis J.P. The mass production of redundant, misleading, and conflicted systematic reviews and meta-analyses // *The Milbank quarterly*. 2016. V. 94. No. 3. P. 485–514. doi: 10.1111/1468-0009.12210
8. Dhital S., Rupakheti D. Bibliometric analysis of global research on air pollution and human health: 1998–2017 // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. V. 6 (13). P. 13103–13114. doi: 10.1007/s11356-019-04482-x
9. Tainio M., Jovanovic Andersen Z., Nieuwenhuijsen M.J., Hu L., de Nazelle A., An R., Garcia L.M.T., Goenka S., Zapata-Diomedes B., Bull F., Sá T.H. Air pollution, physical activity and health: a mapping review of the evidence // *Environment International*. 2021 V. 147. Article No. 105954. doi: 10.1016/j.envint.2020.105954
10. Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A., Bezirtzoglou E. Environmental and health impacts of air pollution: a review // *Frontiers in Public Health*. 2020. V. 8. Article No. 14. doi: 10.3389/fpubh.2020.00014
11. Kim H., Kim J., Kim S., Kang S.H., Kim H.J., Kim H., Heo J., Yi S.M., Kim K., Youn T.J., Chae I.H. Cardiovascular effects of long-term exposure to air pollution: a population-based study with 900845 person-years of follow-up // *Journal of the American Heart Association*. 2017. V. 6. No. 11. Article No. e007170. doi: 10.1161/JAHA.117.007170
12. Kim I.S., Yang P.S., Lee J., Yu H.T., Kim T.H., Uhm J.S., Pak H.N., Lee M.H., Joung B. Long-term exposure of fine particulate matter air pollution and incident atrial fibrillation in the general population: a nationwide cohort study // *International Journal of Cardiology*. 2019. V. 283. P. 178–183. doi: 10.1016/j.ijcard.2018.12.048
13. Yang X., Liang F., Li J., Chen J., Liu F., Huang K., Cao J., Chen S., Xiao Q., Liu X., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Wu X., Li Y., Zhao L., Hu D., Huang J., Lu X., Liu Y., Gu D. Associations of long-term exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> with mortality in Chinese adults: a pooled analysis of cohorts in the China-PAR project // *Environment International*. 2020. V. 138. Article No. 105589. doi: 10.1016/j.envint.2020.105589
14. Yin P., Brauer M., Cohen A., Burnett R.T., Liu J., Liu Y., Liang R., Wang W., Qi J., Wang L., Zhou M. Long-term fine particulate matter exposure and nonaccidental and cause-specific mortality in a large national cohort of Chinese men // *Environmental Health Perspectives*. 2017. V. 125. No. 11. Article No. 117002. doi: 10.1289/EHP1673
15. Yang Y., Tang R., Qiu H., Lai P.C., Wong P., Thach T.Q., Allen R., Brauer M., Tian L., Barratt B. Long term exposure to air pollution and mortality in an elderly cohort in Hong Kong // *Environment International*. 2018. V. 117. P. 99–106. doi: 10.1016/j.envint.2018.04.034
16. Peng Z., Liu C., Xu B., Kan H., Wang W. Long-term exposure to ambient air pollution and mortality in a Chinese tuberculosis cohort // *Science of the Total Environment*. 2017. V. 580. P. 1483–1488. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.128
17. Liu S., Zhou Y., Liu S., Chen X., Zou W., Zhao D., Li X., Pu J., Huang L., Chen J., Li B., Liu S., Ran P. Association between exposure to ambient particulate matter and chronic obstructive pulmonary disease: results from a cross-sectional study in China // *Thorax*. 2016. V. 72. No. 9. P. 788–795. doi: 10.1136/thoraxjnl-2016-208910
18. Li R., Zhou R., Zhang J. Function of PM<sub>2.5</sub> in the pathogenesis of lung cancer and chronic airway inflammatory diseases (review) // *Oncology Letters*. 2018. V. 15. No. 5. P. 7506–7514. doi: 10.3892/ol.2018.8355
19. Li J., Lu X., Liu F., Liang F., Huang K., Yang X., Xiao Q., Chen J., Liu X., Cao J., Chen S., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Zhao L., Wu X., Li Y., Hu D., Huang J., Zhu M., Liu Y., Shen H., Gu D. Chronic effects of high fine particulate matter exposure on lung cancer in China // *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 2020. V. 202. No. 11. P. 1551–1559. doi: 10.1164/rccm.202001-00020C
20. Zhang Z., Yan W., Chen Q., Zhou N., Xu Y. The relationship between exposure to particulate matter and breast cancer incidence and mortality: a meta-analysis // *Medicine (Baltimore)*. 2019. V. 98. No. 50. Article No. e18349. doi: 10.1097/MD.00000000000018349
21. Chen J., Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis // *Environment International*. 2020. V. 143. Article No. 105974. doi: 10.1016/j.envint.2020.105974
22. Chen G., Wang A., Li S., Zhao X., Wang Y., Li H., Meng X., Knibbs L.D., Bell M.L., Abramson M.J., Wang Y., Guo Y. Long-term exposure to air pollution and sur-

- vival after ischemic stroke // *Stroke*. 2019. V. 50. No. 3. P. 563–570. doi: 10.1161/strokeaha.118.023264
23. Saltykova M.M., Balakaeva A.V., Shopina O.V., Bobrovnikskii I.P. Analysis of associations between air pollution and mortality from noncommunicable diseases across genders and age-groups // *Ekologiya Cheloveka (Human Ecology)*. 2021. V. 28. No. 12. P. 14–22 (in Russian). doi: 10.33396/1728-0869-2021-12-14-22
24. Gurung A., Son J.-Y., Bell M.L. Particulate matter and risk of hospital admission in the Kathmandu Valley, Nepal: a case-crossover study // *American Journal of Epidemiology*. 2017. V. 186. No. 5. P. 573–580. doi: 10.1093/aje/kwx135
25. Huang K., Liang F., Yang X., Liu F., Li J., Xiao Q., Chen J., Liu X., Cao J., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Zhao L., Wu X., Li Y., Hu D., Huang J., Liu Y., Lu X., Gu D. Long term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of stroke: prospective cohort study from the China-PAR project // *BMJ*. 2019. V. 367. Article No. 16720. doi: 10.1136/bmj.16720
26. Huang K., Yang X., Liang F., Liu F., Li J., Xiao Q., Chen J., Liu X., Cao J., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Zhao L., Wu X., Li Y., Hu D., Huang J., Liu Y., Lu X., Gu D. Long-term exposure to fine particulate matter and hypertension incidence in China // *Hypertension*. 2019. V. 73. No. 6. P. 1195–1201. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.119.12666
27. Li J., Liu F., Liang F., Huang K., Yang X., Xiao Q., Chen J., Liu X., Cao J., Chen S., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Zhao L., Wu X., Li Y., Hu D., Huang J., Liu Y., Lu X., Gu D. Long-term effects of high exposure to ambient fine particulate matter on coronary heart disease incidence: a population-based Chinese cohort study // *Environmental Science & Technology*. 2020. V. 54. No. 11. P. 6812–6821. doi: 10.1021/acs.est.9b06663
28. Liang F., Liu F., Huang K., Yang X., Li J., Xiao Q., Chen J., Liu X., Cao J., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Wu X., Li Y., Hu D., Huang J., Liu Y., Lu X., Gu D. Long-term exposure to fine particulate matter and cardiovascular disease in China // *Journal of the American College of Cardiology*. 2020. V. 75. No. 7. P. 707–717. doi: 10.1016/j.jacc.2019.12.031
29. Guo C., Zeng Y., Chang L.Y., Yu Z., Bo Y., Lin C., Lau A.K., Tam T., Lao X.Q. Independent and opposing associations of habitual exercise and chronic PM<sub>2.5</sub> exposures on hypertension incidence // *Circulation*. 2020. V. 142. No. 7. P. 645–656. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.120.045915
30. Kim O.J., Lee S.H., Kang S.H., Kim S.Y. Incident cardiovascular disease and particulate matter air pollution in South Korea using a population-based and nationwide cohort of 0.2 million adults // *Environmental Health*. 2020. V. 19. No. 1. Article No. 113. doi: 10.1186/s12940-020-00671-1
31. Noh J., Sohn J., Han M., Kang D.R., Choi Y.J., Kim H.C., Suh I., Kim C., Shin D.C. Long-term effects of cumulative average PM<sub>2.5</sub> exposure on the risk of hemorrhagic stroke // *Epidemiology*. 2019. V. 30. Suppl. 1. P. S90–S98. doi: 10.1097/EDE.0000000000001001
32. Zhang Z., Kang J., Hong Y.S., Chang Y., Ryu S., Park J., Cho J., Guallar E., Shin H.C., Zhao D. Long-term particulate matter exposure and incidence of arrhythmias: a cohort study // *Journal of the American Heart Association*. 2020. V. 9. No. 22. Article No. e016885. doi: 10.1161/JAHA.120.016885
33. Li T., Hu R., Chen Z., Li Q., Huang S., Zhu Z., Zhou L.F. Fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>): the culprit for chronic lung diseases in China // *Chronic Diseases and Translational Medicine*. 2018. V. 4. No. 3. P. 176–186. doi: 10.1016/j.cdtm.2018.07.002
34. Guo C., Zhang Z., Lau A.K.H., Lin C.Q., Chuang Y.C., Chan J., Jiang W.K., Tam T., Yeoh E.K., Chan T.C., Chang L.Y., Lao X.Q. Effect of long-term exposure to fine particulate matter on lung function decline and risk of chronic obstructive pulmonary disease in Taiwan: a longitudinal, cohort study // *The Lancet Planetary Health*. 2018. V. 2. No. 3. P. e114–e125. doi: 10.1016/S2542-5196(18)30028-7
35. Han C., Oh J., Lim Y.H., Kim S., Hong Y.C. Long-term exposure to fine particulate matter and development of chronic obstructive pulmonary disease in the elderly // *Environment International*. 2020. V. 143. Article No. 105895. doi: 10.1016/j.envint.2020.105895
36. Maklakova O.A. Assessing risks of respiratory organs diseases and co-morbid pathology in children caused by ambient air contamination with technogenic chemicals (cohort study) // *Health Risk Analysis*. 2019. No. 2. P. 56–63. doi: 10.21668/health.risk/2019.2.06.eng
37. Kramar L.V., Larina T.Yu., Morozova D.Yu. Assessment of the effect of atmospheric air pollution on the incidence of bronchial obstruction in children with acute respiratory viral infections // *Modern problems of science and education*. 2019. V. 5. P. 100 (in Russian).
38. Thurston G.D., Balmes J.R., Garcia E., Gilliland F.D., Rice M.B., Schikowski T., Van Winkle L.S., Annesi-Maesano I., Burchard E.G., Carlsten C., Harkema J.R., Khreis H., Kleeberger S.R., Kodavanti U.P., London S.J., McConnell R., Peden D.B., Pinkerton K.E., Reibman J., White C.W. Outdoor air pollution and new-onset airway disease. An official American thoracic society workshop report // *Annals of the American Thoracic Society*. 2020. V. 17. No. 4. P. 387–398. doi: 10.1513/AnnalsATS.202001-046ST
39. Orellano P., Quaranta N., Reynoso J., Balbi B., Vasquez J. Effect of outdoor air pollution on asthma exacerbations in children and adults: systematic review and multilevel meta-analysis // *PLoS One*. 2017. V. 12. No. 3. Article No. e0174050. doi: 10.1371/journal.pone.0174050
40. Kravitz-Wirtz N., Teixeira S., Hajat A., Woo B., Crowder K., Takeuchi D. Early-life air pollution exposure, neighborhood poverty, and childhood asthma in the United States, 1990–2014 // *International Journal of Environmen-*

- tal Research and Public Health. 2018. V. 15. No. 6. Article No. 1114. doi: 10.3390/ijerph15061114
41. Achakulwisut P., Brauer M., Hystad P., Anenberg S.C. Global, national, and urban burdens of paediatric asthma incidence attributable to ambient NO<sub>2</sub> pollution: estimates from global datasets // *The Lancet Planetary Health*. 2019. V. 3. No. 4. P. e166–e178. doi: 10.1016/S2542-5196(19)30046-4
42. To T., Zhu J., Stieb D., Gray N., Fong I., Pinault L., Jerrett M., Robichaud A., Ménard R., van Donkelaar A., Martin R.V., Hystad P., Brook J.R., Dell S. Early life exposure to air pollution and incidence of childhood asthma, allergic rhinitis and eczema // *European Respiratory Journal*. 2020. V. 55. No. 2. Article No. 1900913. doi: 10.1183/13993003.00913-2019
43. Havet A., Zerimech F., Sanchez M., Siroux V., Le Moual N., Brunekreef B., Stempfelet M., Künzli N., Jacquemin B., Matran R., Nadif R. Outdoor air pollution, exhaled 8-isoprostane and current asthma in adults: The EGEA study // *European Respiratory Journal*. 2018. V. 51. No. 4. Article No. 1702036. doi: 10.1183/13993003.02036-2017
44. Dai Y., Qiu H., Sun S., Yang Y., Lin H., Tian L. Age-dependent effect of ambient ozone on emergency asthma hospitalizations in Hong Kong // *The Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2018. V. 141. No. 4. P. 1532–1534. doi: 10.1016/j.jaci.2018.01.006
45. Li X., Chen Q., Zheng X., Li Y., Han M., Liu T., Xiao J., Guo L., Zeng W., Zhang J., Ma W. Effects of ambient ozone concentrations with different averaging times on asthma exacerbations: a meta-analysis // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 691. P. 549–561. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.382
46. Hong E., Lee S., Kim G.-B., Kim T.-J., Kim H.-W., Lee K., Son B.-S. Effects of environmental air pollution on pulmonary function level of residents in Korean industrial complexes // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. V. 15. No. 5. Article No. 834. doi: 10.3390/ijerph15050834
47. Li Z., Xu X., Thompson L.A., Gross H.E., Shenkman E.A., DeWalt D.A., Huang I.-C. Longitudinal effect of ambient air pollution and pollen exposure on asthma control: the patient-reported outcomes measurement information system (PROMIS) pediatric asthma study // *Academic Pediatrics*. 2019. V. 19. No. 6. P. 615–623. doi: 10.1016/j.acap.2019.03.010
48. Chan T.C., Zhang Z., Lin B.C., Lin C., Deng H.B., Chuang Y.C., Chan J.W.M., Jiang W.K., Tam T., Chang L.Y., Hoek G., Lau A.K.H., Lao X.Q. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and chronic kidney disease: a cohort study // *Environmental Health Perspectives*. 2018. V. 126. No. 10. Article No. 107002. doi: 10.1289/EHP3304
49. Lin S.Y., Ju S.W., Lin C.L., Hsu W.H., Lin C.C., Ting I.W., Kao C.H. Air pollutants and subsequent risk of chronic kidney disease and end-stage renal disease: a population-based cohort study // *Environmental Pollution*. 2020. V. 261. Article No. 114154. doi: 10.1016/j.envpol.2020.114154
50. Ran J., Sun S., Han L., Zhao S., Chen D., Guo F., Li J., Qiu H., Lei Y., Tian L. Fine particulate matter and cause-specific mortality in the Hong Kong elder patients with chronic kidney disease // *Chemosphere*. 2020. V. 247. Article No. 125913. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125913
51. Fan H.C., Chen C.Y., Hsu Y.C., Chou R.H., Teng C.J., Chiu C.H., Hsu C.Y., Muo C.H., Chang M.Y., Chang K.H. Increased risk of incident nasopharyngeal carcinoma with exposure to air pollution // *PLoS One*. 2018. V. 13. No. 9. Article No. e0204568. doi: 10.1371/journal.pone.0204568
52. Zhang H., Li Z. MicroRNA-16 via Twist1 inhibits EMT induced by PM<sub>2.5</sub> exposure in human hepatocellular carcinoma // *Open Medicine (Wars)*. 2019. V. 14. No. 1. P. 673–682. doi: 10.1515/med-2019-0078
53. Teng B., Zhang X., Yi C., Zhang Y., Ye S., Wang Y., Tong D.Q., Lu B. The association between ambient air pollution and allergic rhinitis: further epidemiological evidence from Changchun, Northeastern China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017. V. 14. No. 3. Article No. 226. doi: 10.3390/ijerph14030226
54. Chen J.H., Kuo T.Y., Yu H.L., Wu C., Yeh S.L., Chiou J.M., Chen T.F., Chen Y.C. Long-term exposure to air pollutants and cognitive function in Taiwanese community-dwelling older adults: a four-year cohort study // *Journal of Alzheimer's Disease*. 2020. V. 78. No. 4. P. 1585–1600. doi: 10.3233/JAD-200614
55. Wang J., Li T., Lv Y., Kraus V.B., Zhang Y., Mao C., Yin Z., Shi W., Zhou J., Zheng T., Kinney P.L., Ji J., Tang S., Shi X. Fine particulate matter and poor cognitive function among Chinese older adults: evidence from a community-based, 12-year prospective cohort study // *Environmental Health Perspectives*. 2020. V. 128. No. 6. Article No. 67013. doi: 10.1289/EHP5304
56. Braithwaite I., Zhang S., Kirkbride J.B., Osborn D.P., Hayes J.F. Air pollution (particulate matter) exposure and associations with depression, anxiety, bipolar, psychosis and suicide risk: a systematic review and meta-analysis // *Environmental Health Perspectives*. 2019. V. 127. No. 12. Article No. 126002. doi: 10.1289/EHP4595
57. Liu Q., Wang W., Gu X., Deng F., Wang X., Lin H., Guo X., Wu S. Association between particulate matter air pollution and risk of depression and suicide: a systematic review and meta-analysis // *Environmental Science and Pollution Research International*. 2021. V. 28. No. 8. P. 9029–9049. doi: 10.1007/s11356-021-12357-3
58. Davoudi M., Barjasteh-Askari F., Amini H., Lester D., Mahvi A.H., Ghavami V., Rezvani Ghalhari M. Association of suicide with short-term exposure to air pollution at different lag times: a systematic review and meta-analysis // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 771. Article No. 144882. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144882

59. Zeng Y., Lin R., Liu L., Liu Y., Li Y. Ambient air pollution exposure and risk of depression: a systematic review and meta-analysis of observational studies // *Psychiatry Research*. 2019. V. 276. P. 69–78. doi: 10.1016/j.psychres.2019.04.019
60. Fu P., Guo X., Cheung F.M.H., Yung K.K.L. The association between PM<sub>2.5</sub> exposure and neurological disorders: a systematic review and meta-analysis // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 655. P. 1240–1248. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.218
61. Peters R., Mudway I., Booth A., Peters J., Anstey K.J. Putting fine particulate matter and dementia in the wider context of noncommunicable disease: where are we now and what should we do next: a systematic review // *Neuroepidemiology*. 2021. V. 55. No. 4. P. 253–265. doi: 10.1159/000515394
62. Shi L., Steenland K., Li H., Liu P., Zhang Y., Lyles R.H., Requia W.J., Ilango S.D., Chang H.H., Wingo T., Weber R.J., Schwartz J. A national cohort study (2000–2018) of long-term air pollution exposure and incident dementia in older adults in the United States // *Nature Communications*. 2021. V. 12. No. 1. Article No. 6754. doi: 10.1038/s41467-021-27049-2
63. Livingston G., Huntley J., Sommerlad A., Ames D., Ballard C., Banerjee S., Brayne C., Burns A., Cohen-Mansfield J., Cooper C., Costafreda S.G., Dias A., Fox N., Gitlin L.N., Howard R., Kales H.C., Kivimäki M., Larson E.B., Ogunniyi A., Orgeta V., Ritchie K., Rockwood K., Sampson E.L., Samus Q., Schneider L.S., Selb k G., Teri L., Mukadam N. Dementia prevention, intervention, and care: 2020 report of the Lancet Commission // *The Lancet*. 2020. V. 396. No. 10248. P. 413–446. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30367-6
64. GBD 2019 diseases and injuries collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019 // *The Lancet*. 2020. V. 396. No. 10258. P. 1204–1222. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30925-9
65. Peters R., Ee N., Peters J., Booth A., Mudway I., Anstey K.J. Air pollution and dementia: a systematic review // *Journal of Alzheimer's Disease*. 2019. V. 70. Suppl. 1. P. S145–S163. doi: 10.3233/JAD-180631
66. Buoli M., Grassi S., Caldiroli A., Carnevali G.S., Mucci F., Iodice S., Cantone L., Pergoli L., Bollati V. Is there a link between air pollution and mental disorders? // *Environment International*. 2018. V. 118. P. 154–168. doi: 10.1016/j.envint.2018.05.044
67. Lee S., Park H., Kim S., Lee E.K., Lee J., Hong Y.S., Ha E. Fine particulate matter and incidence of metabolic syndrome in non-CVD patients: a nationwide population-based cohort study // *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2019. V. 222. No. 3. P. 533–540. doi: 10.1016/j.ijheh.2019.01.010
68. Bo Y., Chang L.Y., Guo C., Zhang Z., Lin C., Chuang Y.C., Jiang W.K., Tam T., Chan T.C., Lin C.Y., Lau A.K., Lao X.Q., Yeoh E.K. Association of long-term exposure to fine particulate matter and incident dyslipidaemia: a longitudinal cohort study // *Environmental Research*. 2019. V. 173. P. 359–365. doi: 10.1016/j.envres.2019.03.034
69. Lin S.Y., Yang Y.C., Chang Y.Y., Lin C.C., Hsu W.H., Ju S.W., Hsu C.Y., Kao C.H. Risk of polycystic ovary syndrome in women exposed to fine air pollutants and acidic gases: a nationwide cohort analysis // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. V. 16. No. 23. Article No. 4816. doi: 10.3390/ijerph16234816
70. Li C.Y., Wu C.D., Pan W.C., Chen Y.C., Su H.J. Association between long-term exposure to PM<sub>2.5</sub> and incidence of type 2 diabetes in Taiwan: a national retrospective cohort study // *Epidemiology*. 2019. V. 30. Suppl. 1. P. S67–75. doi: 10.1097/EDE.0000000000001035
71. Liang F., Yang X., Liu F., Li J., Xiao Q., Chen J., Liu X., Cao J., Shen C., Yu L., Lu F., Wu X., Zhao L., Wu X., Li Y., Hu D., Huang J., Liu Y., Lu X., Gu D. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of diabetes in China: a cohort study // *Environment International*. 2019. V. 126. P. 568–575. doi: 10.1016/j.envint.2019.02.069
72. Qiu H., Schooling C.M., Sun S., Tsang H., Yang Y., Lee R.S.Y., Wong C.M., Tian L. Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and type 2 diabetes mellitus in elderly: a cohort study in Hong Kong // *Environment International*. 2018. V. 113. P. 350–356. doi: 10.1016/j.envint.2018.01.008
73. Lao X.Q., Guo C., Chang L.Y., Bo Y., Zhang Z., Chuang Y.C., Jiang W.K., Lin C., Tam T., Lau A.K.H., Lin C.Y., Chan T.C. Long-term exposure to ambient fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and incident type 2 diabetes: a longitudinal cohort study // *Diabetologia*. 2019. V. 62. No. 5. P. 759–769. doi: 10.1007/s00125-019-4825-1
74. Klepac P., Locatelli I., Korošec S., Künzli N., Kukec A. Ambient air pollution and pregnancy outcomes: a comprehensive review and identification of environmental public health challenges // *Environmental Research*. 2018. V. 167. P. 144–159. doi: 10.1016/j.envres.2018.07.008
75. Bekkar B., Pacheco S., Basu R., DeNicola N. Association of air pollution and heat exposure with preterm birth, low birth weight, and stillbirth in the US: a systematic review // *JAMA Network Open*. 2020. V. 3. No. 6. Article No. e208243. doi: 10.1001/jamanetworkopen.2020.8243
76. Simoncic V., Enaux C., Deguen S., Kihal-Talantikite W. Adverse birth outcomes related to NO<sub>2</sub> and PM exposure: European systematic review and meta-analysis // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. V. 17. No. 21. Article No. 8116. doi: 10.3390/ijerph17218116
77. Shi W., Sun C., Chen Q., Ye M., Niu J., Meng Z., Bukulmez O., Chen M., Teng X. Association between ambient air pollution and pregnancy outcomes in patients undergoing *in vitro* fertilization in Shanghai, China: a retrospective cohort study // *Environment Interna-*

tional. 2021. V. 148. Article No. 106377. doi: 10.1016/j.envint.2021.106377

78. Zhukovsky C., Bind M.-A., Boström I., Landtblom A.-M. Air pollution as a contributing factor of relapses and cases of multiple sclerosis // *Health Risk Analysis*. 2020. No. 3. P. 169–175. doi: 10.21668/health.risk/2020.3.20.eng

79. Ogen Y. Assessing nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality // *Science of the Total Environment*. 2020. V. 726. Article No. 138605. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138605

80. Meo S.A., Adnan Abukhalaf A., Sami W., Hong T.D. Effect of environmental pollution PM<sub>2.5</sub>, carbon monoxide, and ozone on the incidence and mortality due to SARS-CoV-2 infection in London, United Kingdom // *Journal of King Saud University – Science*. 2021. V. 33. No. 3. Article No. 101373. doi: 10.1016/j.jksus.2021.101373

81. Li J., Wang Y., Yin P., Huang J., Wu Z., Cao R., Wang L., Zeng Q., Pan X., Li G., Zhou M. The burden of sulfur dioxide pollution on years of life lost from chronic obstructive pulmonary disease: a nationwide analysis in China // *Environmental Research*. 2021. V. 194. Article No. 110503. doi: 10.1016/j.envres.2020.110503

82. Myakisheva Yu.V., Pavlov A.F., Rodionova G.N., Mikhaylyuk N.A. The impact of priority air pollutants on the health of the population of the Kuybyshev district in the city of Samara, Samara oblast // *International research journal*. 2021. No. 7 (109). P. 33–38 (in Russian). doi: 10.23670/IRJ.2021.109.7.039

83. Cao D., Zheng D., Qian Z.M., Shen H., Liu Y., Liu Q., Sun J., Zhang S., Jiao G., Yang X., Vaughn M.G., Wang C., Zhang X., Lin H. Ambient sulfur dioxide and hospital expenditures and length of hospital stay for respiratory diseases: a multicity study in China // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2022. V. 229. Article No. 113082. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.113082

84. Shen S., Li X., Yuan C., Huang Q., Liu D., Ma S., Hui J., Liu R., Wu T., Chen Q. Association of short-term exposure to sulfur dioxide and hospitalization for ischemic and hemorrhagic stroke in Guangzhou, China // *BMC Public Health*. 2020. V. 20. No. 1. Article No. 263. doi: 10.1186/s12889-020-8354-0

85. Li Y.L., Chuang T.W., Chang P.Y., Lin L.Y., Su C.T., Chien L.N., Chiou H.Y. Long-term exposure to ozone and sulfur dioxide increases the incidence of type 2 diabetes mellitus among aged 30 to 50 adult population // *Environmental Research*. 2021. V. 194. Article No. 110624. doi: 10.1016/j.envres.2020.110624

86. Kong D., Liang J., Liu C. Invisible enemy: the health impact of ozone // *China Economic Review*. 2022. V. 72. Article No. 101760. doi: 10.1016/j.chieco.2022.101760

87. Lin C., Ma Y., Liu R., Shao Y., Ma Z., Zhou L., Jing Y., Bell M.L., Chen K. Associations between short-term ambient ozone exposure and cause-specific mortality in rural and urban areas of Jiangsu, China // *Environmental Research*. 2022. V. 211. Article No. 113098. doi: 10.1016/j.envres.2022.113098

88. Wang Y., Cao R., Xu Z., Jin J., Wang J., Yang T., Wei J., Huang J., Li G. Long-term exposure to ozone and diabetes incidence: a longitudinal cohort study in China // *Science of The Total Environment*. 2022. V. 816. Article No. 151634. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151634

89. Holm S.M., Balmes J.R. Systematic review of ozone effects on human lung function, 2013 through 2020 // *Chest*. 2022. V. 161. No. 1. P. 190–201. doi: 10.1016/j.chest.2021.07.2170

90. Chen K., Breitner S., Wolf K., Stafoggia M., Sera F., Vicedo-Cabrera A.M., Guo Y., Tong S., Lavigne E., Matus P., Valdés N., Kan H., Jaakkola J.J.K., Rytö N.R.I., Huber V., Scortichini M., Hashizume M., Honda Y., Nunes B., Madureira J., Holobacă I.H., Fratianne S., Kim H., Lee W., Tobias A., Íñiguez C., Forsberg B., Åström C., Ragettli M.S., Guo Y.L.L., Chen B.Y., Li S., Milojevic A., Zanobetti A., Schwartz J., Bell M.L., Gasparini A., Schneider A. Ambient carbon monoxide and daily mortality: a global time-series study in 337 cities // *The Lancet Planetary Health*. 2021. V. 5. No. 4. P. e191–e199. doi: 10.1016/S2542-5196(21)00026-7

91. Schraufnagel D.E., Balmes J.R., Cowl C.T., De Matteis S., Jung S.H., Mortimer K., Perez-Padilla R., Rice M.B., Riojas-Rodriguez H., Sood A., Thurston G.D., To T., Vanker A., Wuebbles D.J. Air pollution and noncommunicable diseases: a review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air pollution and organ systems // *Chest*. 2019. V. 155. No. 2. P. 417–426. doi: 10.1016/j.chest.2018.10.041

92. Kumar S., Sharma A., Thaker R. Air pollutants and impairments of male reproductive health – an overview // *Reviews on Environmental Health*. 2021. V. 36. No. 4. P. 565–575. doi: 10.1515/reveh-2020-0136

93. Viegi G., Baldacci S., Maio S., Fasola S., Annesi-Maesano I., Pistelli F., Carrozzi L., La Grutta S., Forastiere F. Health effects of air pollution: a Southern European perspective // *Chinese Medical Journal*. 2020. V. 133. No. 13. P. 1568–1574. doi: 10.1097/CM9.0000000000000869

## Применение микробных биотехнологий для устранения в почве остатков гербицидов классов имидазолинонов и сульфонилмочевин (обзор)

© 2023. О. В. Колотова<sup>1,2</sup>, к. т. н., доцент, старший инженер-биолог,  
Е. Э. Нефедьева<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор, зав. испытательным биологическим центром,  
И. Р. Грибуст<sup>2</sup>, к. б. н., ведущий инженер-биолог,  
Е. А. Сухова<sup>1,2</sup>, аспирант, инженер-биолог, Е. А. Звада<sup>1</sup>, магистрант,  
В. В. Шевелёва<sup>1</sup>, магистрант,

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет,  
400005, Россия, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28,

<sup>2</sup>ООО «АгроЭкспертГруп»,  
107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 40, стр. 13, пом. 811,  
e-mail: olgakolotova@mail.ru

Обзор посвящён проблемам применения современных имидазолиноновых и сульфонилмочевинных гербицидов, а также разработкам в области микробной биотехнологии для ремедиации загрязнённых почв. В статье приведены данные о характере действия остаточных количеств гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин на целевые и последующие культуры в севооборотах. Показаны проблемы мониторинга остатков гербицидов в связи с разнообразием свойств компонентов и механизмов разложения в почве. Рассматриваются экологические аспекты влияния имидазолинонов и сульфонилмочевин на микробиоту почвы и нецелевые организмы. Приводятся результаты исследований путей биодеградации компонентов гербицидов, а также условий, способствующих ускорению деструктивных процессов. Обоснована актуальность поиска микроорганизмов-деструкторов имидазолинонов и сульфонилмочевин для получения биопрепаратов. Показано, что деструктивным потенциалом в отношении имидазолинонов и сульфонилмочевин обладают микроорганизмы разных родов: *Rhodococcus*, *Rahnella*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Methylopila*, *Ancylobacter*, *Hansschlegelia*, *Klebsiella*, *Arthrobacter*. Приводятся современные данные о разработках биопрепаратов для устранения остаточных количеств имидазолинонов и сульфонилмочевин в почвах для снижения фитотоксического эффекта.

**Ключевые слова:** гербициды, имидазолиноны, сульфонилмочевины, микрофлора почвы, биодеструкция, микроорганизмы, биопрепараты, ремедиация почв.

## Application of microbial biotechnologies to eliminate residues of herbicides of imidazolinone and sulfonylurea classes in soil (review)

© 2023. O. V. Kolotova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2206-2822,  
E. E. Nefedieva<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-4782-3835, I. R. Gribust<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-7544-674X,  
E. A. Sukhova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-3171-7106, E. A. Zvada<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6872-0659,  
V. V. Sheveleva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2815-2463

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University,  
28, Lenina Avenue, Volgograd, Russia, 400005,  
<sup>2</sup>ООО «АгроЭкспертГруп»,  
room 811, p. 13, 40, Bolshaya Semenovskaya St., Moscow, Russia, 107023,  
e-mail: olgakolotova@mail.ru

The review is devoted to the problems of application of modern imidazolinone and sulfonylurea herbicides, as well as to the researches in the field of microbial biotechnology for remediation of contaminated soils. Data on the traits of the influence of residual amounts of herbicides from the classes of imidazolinones and sulfonylureas on target and subsequent crops in crop rotations are given in the article. The problems of monitoring of herbicide residues due to the variety of properties of components and decomposition mechanisms in the soil are shown. Ecological aspects of the influence of imidazolinones and sulfonylureas on soil microbiota and non-target organisms are considered. The results of

studies of the biodegradation pathways of herbicide components, as well as conditions that contribute to the acceleration of destructive processes, are presented. The relevance of the search for microorganisms-destroyers of imidazolinones and sulfonylureas for the production of biological products is substantiated. Microorganisms of different genera, such as *Rhodococcus*, *Rahnella*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Methylophilus*, *Ancylobacter*, *Hansschlegelia*, *Klebsiella*, and *Arthrobacter*, possess destructive potential against imidazolinones and sulfonylureas. The current data on the development of biological products to eliminate residues of imidazolinones and sulfonylureas in soils to reduce the phytotoxic effect are given.

**Keywords:** herbicides, imidazolinones, sulfonylureas, soil microflora, biodestruction, microorganisms, biological products, soil remediation.

Загрязнение биосферы пестицидами – одна из наиболее актуальных проблем современной экологии. Опасность представляют как сами действующие вещества пестицидных препаратов, так и различные их компоненты: ПАВы, растворители, адъюванты и т. д. По данным на начало 2019 г. среди применяемых на территории Российской Федерации (РФ) пестицидов 97,6% от общего объёма (63,48 тыс. т) составили химические средства защиты растений (ХСЗР). Больше всего было использовано гербицидов. В 2018 г. объём использованных гербицидов составил 36,2 тыс. т, или 55,6% от общего объёма пестицидов [1]. Растут в России и площади применения пестицидов. По данным Российского Союза производителей ХСЗР, на фоне высокого спроса на сельхозпродукцию, развития технологий, направленных на повышение урожайности, увеличивается потребление химических средств защиты растений. В 2020 г. общий объём применённых препаратов составил 188 тыс. т, по итогам 2021 г. – около 210 тыс. т. Гербицидный рынок занимает, по разным данным, от 60 до 70% от всей производимой пестицидной продукции [1]. Приведённые данные показывают возрастающие масштабы применения гербицидов в РФ, что несомненно усугубляет проблемы, связанные с накоплением остаточных количеств препаратов в объектах окружающей среды (ОС), в первую очередь, в почве, а также связанные с фитотоксическим последствием и ограничением севооборота, негативным влиянием на культивируемые растения и фауну. В дополнение к проблеме устойчивости, применение и чрезмерное использование гербицидов привело к образованию и накоплению метаболитов – продуктов деградации действующих и вспомогательных веществ препаратов в ОС. Эти соединения сохраняются в почве и растениях и приводят к потенциальным токсикологическим проблемам, вызванным накоплением остатков в пищевых цепях [2]. Аккумуляция и миграция токсичных компонентов пестицидов приводит к увеличению экологической нагрузки на поверхностные водоёмы и гидробионтов

[3]. Постоянное применение ядохимикатов с целью защиты растений дополнительно снижает устойчивость агроценозов ввиду токсичности компонентов для микробиоты почвы и насекомых-опылителей [4]. Немаловажен также аспект, связанный с влиянием гербицидов на микрофлору почвы, осуществляющей важнейшие функции синтеза и деградации органических веществ, азотфиксации, гумификации, круговорота биогенных элементов и др. Внесение и накопление гербицидов может приводить к локальным для данной территории перерождениям микробных комплексов, а, следовательно, и нарушениям указанных биогеохимических процессов [5].

Среди наиболее часто применяемых на территории России гербицидов препараты из классов имидазолинонов (ИМ) и сульфонилмочевин. В ассортименте современных гербицидов свыше 25% действующих веществ (д. в.) представлены соединениями, относящимися к классу производных сульфонилмочевин и имидазолинона [6].

Сульфонилмочевин – весьма перспективный класс химических соединений, к которому принадлежат гербициды нового поколения, проявляющие гербицидную активность при нормах расхода на 1–2 порядка ниже по сравнению с традиционно применяемыми препаратами. Имидазолиноны – также, как сульфонилмочевин, принадлежат к относительно новому классу (в мире применяются с 1984 г.) высокоактивных и высокоизбирательных гербицидов [7].

Цель работы – провести анализ современных разработок в области создания и применения биопрепаратов для снижения нагрузки на окружающую среду от гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин.

#### Объекты и методы исследования

Объектом исследования является обзор современных разработок в области создания и применения биопрепаратов на основе микроорганизмов-деструкторов имидазолинонов и сульфонилмочевин. В составлении обзо-

ра по данной теме использовали литературные источники (2004–2023 гг.) из базы данных научной электронной библиотеки, включающей публикации ведущих отечественных и зарубежных учёных-исследователей по этой тематике. Поиск источников проводили на сайте eLIBRARY.RU, а также при помощи поисковых систем Яндекс и Google по следующим запросам: «имидазолиноны», «сульфонилмочевины», «последствие имидазолинонов и сульфониломочевин», «биодеструкция имидазолинонов», «биодеструкция сульфониломочевин», «биопрепараты для ремедиации почв», «остаточные количества гербицидов».

### Механизмы действия и проблемы применения гербицидов из классов имидазолинонов и сульфониломочевин

Имидазолиноны (имазакин, имазетабенз-метил, имазамокс, имазацик, имазацир, имазетапир) представляют класс гербицидов, которые были быстро приняты сельскохозяйственными производителями для борьбы с однодольными и двудольными сорняками, а также для уничтожения другой нежелательной растительности. Имидазолиноны поглощаются листьями и корнями и проникают в меристему – ткань, обеспечивающую рост растений.

Механизм действия гербицидов ИМІ включает ингибирование в восприимчивых видах растений ферментов ацетолатат-синтетазы и ацетогидроксикилот-синтетазы, которые необходимы для биосинтеза аминокислот с разветвлённой цепью (валина, изолейцина и лейцина). Это, в свою очередь, приводит к нарушению процессов синтеза белка, ДНК, прорастания семян и роста растений.

Гербициды ИМІ имеют в своей молекулярной структуре хиральное имидазольное соединение, обуславливающее их биологическую активность.

Вместе с тем, в настоящее время хиральные гербициды представляют собой новый и важный класс загрязнителей ОС [8, 9]. В РФ и странах ЕАЭС максимально допустимые уровни имидазолинонов в пищевом сырье и продукции определены в ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна». Согласно ему, содержание имазакина в соевых бобах не должно превышать 0,1 мг/кг. Для имазамокса установлены следующие нормы: в сое и горохе – не более 0,05 мг/кг, в рапсе и подсолнечнике – не более 0,1 мг/кг, для имазацира в подсолнечнике – не более 0,1 мг/кг, для имазетапира в сое

и бобах – не более 0,5 мг/кг. В Евросоюзе в настоящее время нормы некоторых имидазолинонов в пищевом сырье и продукции как растительного, так и животного происхождения рекомендованы к пересмотру. Так, максимально допустимый уровень (МДУ) имазамокса в сое и горохе предлагается снизить с 0,05 до 0,01 мг/кг. Максимально допустимые уровни для имазацира в бобовых, подсолнечнике, рапсе и сое напротив, предлагается повысить с 0,01 до, соответственно, 0,3 или 0,2 мг/кг, 0,08 или 0,05 мг/кг, 0,05 мг/кг и 5 или 3 мг/кг. Для имазетапира, который не допущен к использованию в странах Евросоюза, МДУ в пищевой продукции составляет 0,01 мг/кг [10, 11].

На практике основными экологическими проблемами при применении гербицидов являются их фитотоксичность по отношению к защищаемым культурам и последующим культурам в севообороте [12]. В связи с высокой биологической эффективностью использование имидазолиноновых гербицидов – адекватный и экономически выгодный способ управления сеgetальным компонентом фитоценоза в системе технологических приёмов интенсивного растениеводства. Регламенты применения препаратов этой группы гербицидов чётко обозначены и предполагают соблюдение мер, исключающих гербицидные токсикозы и фитотоксическое последствие. Однако вследствие широкой поливариантности почвенно-климатических условий даже при соблюдении агротехнических и регламентирующих требований установлены случаи угнетения посевов [13].

При изучении имазамокса и имазетапира в качестве д. в. гербицидов была описана и установлена сорто- и фазоспецифичность реакций группы зернобобовых культур: высокую чувствительность продемонстрировала вика яровая, среднюю – клевер ползучий, козлятник восточный, лядвенец рогатый, люцерна посевная. Низко-чувствительным в опытах был люпин узколистный. А относительную устойчивость продемонстрировали горох, соя и бобы кормовые [14, 15].

Посевы чувствительной культуры горчицы белой показали, что через 350 сут после внесения имазамокс не оказывал никакого влияния. А имазетапир привёл к более чем 60%-ному снижению урожая. Имазапир по сравнению с имазамоксом уже при норме 30 г/га приводит к угнетению гороха. Свёкла, горчица, рапс реагируют на норму от 0,01 до 0,8 мг/кг.

Сложность аналитического определения остаточных количеств имидазолинонов (за частую концентрации д. в. в почве находятся за пределами чувствительности аналитических систем) обуславливает отсутствие чётких представлений о механизмах и сроках их деградации в ОС. Предполагается, что к концу вегетации в почве при благоприятных условиях остаётся не более 2% внесённой дозы препарата, но показатель может приближаться и к 30% [16, 17]. Минимальные количества имазапира могут сохраняться в почве до двух лет и проявляться в виде сильной фитотоксичности для чувствительных культур. Имазамокс чрезвычайно токсичен для высших водных растений и водорослей. Имеются сведения и об эффекте скрытых токсикозов у устойчивых культур, когда без видимых признаков угнетения фитоценоз снижает продуктивность на 15–20% [13].

Сульфонилмочевинные гербициды по объёму применения в растениеводстве в РФ уже не одно десятилетие занимают лидирующие позиции, и масштабы их использования неуклонно растут. В практике народного хозяйства гербициды из производных этого класса применяются практически на всех основных сельскохозяйственных культурах как в виде препаратов на основе индивидуальных действующих веществ, так и в виде различных комбинаций с другими гербицидами.

Сульфонилмочевины относятся к селективным наземным гербицидам гормонального типа, подавляют образование аминокислот изолейцина и валина, нарушают процессы деления клеток и биосинтеза ДНК, что и приводит к подавлению роста сорняков. Сульфонилмочевины быстро и легко проникают через листья, а также частично через корни растений.

Наиболее широкомасштабное использование в народном хозяйстве РФ нашли следующие гербициды этого химического класса: хлорсульфурон, метсульфурон-метил, триасульфурон, римсульфурон, просульфурон, никосульфурон и сульфометурон-метил.

При крайне благоприятных токсикологических характеристиках сульфонилмочевин потенциальную опасность представляет их высочайшая фитотоксичность по отношению ко многим культурным растениям. Такие важнейшие сельскохозяйственные культуры как злаки (пшеница, рожь, ячмень, овёс) относительно устойчивы к сульфонилмочевинам, но возникает проблема с выращиванием культур, следующих в севообороте за злаками [18].

Особенно это касается регионов с чернозёмными и каштановыми почвами, где отрицательное последствие от использования этих гербицидов отмечается в течение 1,5–2 вегетационных сезонов и может проявляться на уровне 15–25% снижения урожая сельхозкультур. Снижение урожайности исследователи объясняют ингибированием метаболических процессов на ферментативном уровне, когда заметных изменений внешних признаков у чувствительных растений – пожелтения листьев, их деформации, искривления стебля – не наблюдается, а может отмечаться лишь некоторое утончение стебля, уменьшение листовых пластинок и т. п. В отсутствие контрольных (необработанных гербицидом) полос такое снижение урожайности может оставаться незамеченным [19].

Исследования показывают, что остаточные количества гербицидов на основе хлорсульфурона и метсульфурон-метила могут повреждать ряд культур, следующих за зерновыми: сахарную свёклу, сою, рапс, кукурузу и другие. Подтверждением фитотоксического действия остатков сульфонилмочевин в почве является снижение в 2–9 раз урожая льна, сахарной свёклы, чечевицы, гороха и картофеля, полученных через 1 год после обработки участка хлорсульфуронном в дозе 10–40 г/га. Остатки метсульфурон-метила в почве через год после применения в дозе 4,5 г/га снижали урожай люцерны на 38, картофеля – на 28% [18]. У культурных растений признаки повреждения сульфонилмочевинами проявляются угнетением корневой системы, недоразвитием корневых волосков, покраснением жилок, появлением хлороза, некроза и, в конечном итоге, наступлением полной гибели растений. Описанные проявления последствия сульфонилмочевинных гербицидов могут стать заметными не сразу, что зависит от концентрации гербицида в почвенном растворе [20]. Непреднамеренные превышения норм расхода препаратов, вызванные, например, перекрытием зон опрыскивания при прохождении и разворотах опрыскивателя, могут нанести ощутимый ущерб урожайности последующих чувствительных культур. В связи с этим актуальность разработки технологий снижения остаточных количеств гербицидов с последствием для подготовки почв к посевам чувствительных культур весьма оправдана.

По мнению исследователей, количественные показатели потерь урожая различных культур зависят от персистентности суль-

фонилмочевин в различных условиях [18]. Практикующие специалисты отмечают, что производные сульфонилмочевины существенно различаются по периоду полураспада в почве, длительность которого зависит от таких факторов, как кислотность почвы (чем ниже рН почвенного раствора, тем быстрее происходит деструкция), погодные условия – низкая температура и недостаток влаги тормозят процесс разложения, чем «короче» лето, тем меньше период активной микробиологической деструкции и тем больше вероятность проявления последствия в следующем вегетационном периоде [20, 21]. Особого внимания в этом отношении требуют препараты на основе хлорсульфуруна, метсульфурун-метила, триасульфурона, тритосульфурона и некоторые другие. Министерством сельского хозяйства Китая в 2014 г. было приостановлено применение хлорсульфуруна, классического сульфонилмочевинного гербицида, демонстрирующего высокую эффективность и безопасность на пшенице, но серьёзно угрожающего нормальному росту последующей кукурузы. При этом  $DT_{50}$  хлорсульфуруна может составлять 18 месяцев в почвах с низкой микробной активностью и высоким уровнем рН [22].

С другой стороны, есть ряд сульфонилмочевинных гербицидов, которые быстро разлагаются в почве. К таким препаратам относятся трибенурон-метил, тифенсульфурун-метил, трифлусульфурон-метил и другие [20].

На территории Алтайского края специалистами выделено 3 зоны, различающиеся по риску последствия на последующие двудольные культуры. Зона 1 – с высоким риском последствия – степи, где наблюдается систематический недостаток влаги, есть щелочные почвы. Микробиологическая активность почвы низкая. Преобладает нулевая или минимальная обработки, и гербицид остаётся в верхних горизонтах. В случае использования полных дозировок «долгоживущих» сульфонилмочевин риск последствия на подсолнечник превышает 50%. Зона 2 – с умеренным риском последствия. В этой зоне выпадает 400–500 мм осадков, почвы в основном нейтральные. Тепла и влаги обычно достаточно для разложения гербицидов, оставшихся в почве. Риск последствия в этой зоне ниже, около 20–30% (2–3 года из 10). На следующий год после применения сульфонилмочевинных гербицидов не рекомендуется сеять свёклу, овощи. При возделывании других культур (рапс, соя, горох, гречиха, подсолнечник) нужно провести отвальную вспашку.

Гербицид рассредоточивается в пахотном слое, и почва становится менее токсичной. Зона 3 – с низким риском последствия. Это увлажнённая зона с кислыми почвами. В этой зоне риск последствия не более 10% (не чаще 1 раза в 10 лет). Здесь практически нет ограничений по севообороту при применении рекомендованных доз гербицидов. Но и в этой зоне не рекомендуется на следующий год после применения метсульфурун-метила и хлорсульфуруна сеять сахарную свёклу.

Таким образом, большое количество факторов, в том числе слабо контролируемых, но влияющих на величину остаточных концентраций гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин в почвах, а также необходимость соблюдения регламентов их содержания в пищевом сырье и продукции подчёркивают несомненную актуальность поиска эффективных технологий устранения остаточных количеств перед посевом чувствительных культур.

### Биодеструкция имидазолинонов и сульфонилмочевин

Почва известна как сложная и динамичная биологическая система, в которой обитает большое разнообразие организмов, выполняющих различные функции. Принимая участие в биогеохимических циклах, они поддерживают многочисленные экосистемные функции почвы [23]. Важнейшим компонентом почвенных биоценозов являются микроорганизмы, обладающие высокой лабильностью ферментных систем и способностью адаптировать их к усвоению органогенов из различных субстратов. Поэтому наиболее важной составляющей процессов разложения гербицидов в почве является деградация почвенной микробиотой [24]. В литературе имеются данные об участии бактерий родов *Methylophila*, *Pseudomonas*, *Ancylobacter*, *Hanschlegelia*, *Klebsiella* и *Rhodococcus* в разложении гербицидов класса сульфонилмочевины, бактерий родов *Arthrobacter*, *Pseudomonas* – имидазолинонов. В связи с нарастающими объёмами применения гербицидов указанных классов подобные исследования приобретают всё большую актуальность и практическую значимость.

В некоторых случаях чрезмерное применение гербицидов негативно сказывается на почвенной микробиоте, влияет на динамику биогеохимических циклов и плодородие почвы. Причина этому – потеря чувствительных

микробных популяций, обеспечивающих специфические экологические функции. Тем не менее, химические структуры гербицидов могут обеспечивать необходимые питательные компоненты для роста микроорганизмов. Дополнительным эффектом чрезмерного использования гербицидов является их воздействие на структуру и состав почвенного микробного сообщества, что оказывает вторичное влияние на питание растений и чувствительность к гербицидам. В значительной степени это связано с воздействием на функции микроорганизмов, участвующих в различных типах взаимодействия с растениями. Гербициды могут влиять на метаболизм растений, изменяя состав экссудатов, используемых для передачи сигналов при взаимодействии растений и микробов [25, 26]. Это было показано на модельном растении *Arabidopsis thaliana* при воздействии гербицида имазетапир. Применение гербицида привело к изменениям в клеточной стенке корня и увеличению производства и эксудации цитрата. Указанные изменения, как предполагается, впоследствии изменили структуру микробного сообщества ризосферных микроорганизмов и изменили морфологию корня. По мнению исследователей, это является фундаментальной причиной для того, чтобы обратить внимание на чрезмерное использование гербицидов в сельском хозяйстве; они могут оказывать токсическое воздействие, которое распространяется по всей пищевой цепи [27].

Структура и способ действия активных ингредиентов, присутствующих в гербицидных препаратах, не являются специфическими для уничтожения сорняков, отчасти из-за большого количества электроотрицательных остатков в их молекулах, включая кислород, гидроксид, сульфонил, фосфорную кислоту, амин и хлор [28]. Микроорганизмы, которые важны для поддержания плодородия почвы, также могут пострадать от окислительного стресса, вызванного электроотрицательностью химических структур, составляющих активные ингредиенты гербицидов. Хотя основное назначение гербицидов – повреждать или уничтожать сорняки-мишени, они могут провоцировать окислительный стресс у различных нецелевых организмов за счёт образования свободных радикалов. Ингибируя метаболические пути в сорняках, активные молекулы гербицидов генерируют активные формы кислорода, тем самым воздействуя на ферменты и в нецелевых организмах.

Более конкретно, основной эффект гербицидов, который изменяет фотосинтетические

системы, может влиять на другие растения, помимо их основных целей, а также воздействовать на фотосинтезирующие цианобактерии. В некоторых ситуациях метаболические промежуточные продукты распада гербицидов могут быть токсичными для нецелевых организмов, возможно, сохраняя электроотрицательные остатки в своих молекулярных структурах [25, 29].

В литературе имеются сведения о проблемах применения отдельных д. в. гербицидов из классов имидазолинонов и сульфонилмочевин. Представитель имидазолинонов имазапир – гербицид широкого спектра действия, более устойчив в почвенной среде, чем другие неселективные гербициды, и может бороться с сорняками в течение 5 месяцев. Было доказано, что микробная трансформация является основным механизмом, ответственным за разложение имзапира. За счёт жизнедеятельности микроорганизмов деструкция имзапира в нестерильных почвах может достигать от 62 до 78%. При этом в почве в аэробных условиях имзапир может образовывать второстепенные метаболиты, которые затем в конечном итоге минерализуются. По данным [30] два выделенных из почвы штамма *Pseudomonas fluorescens* и *Bacillus cereus* наиболее эффективно разлагают имзапир в почвенной среде.

Был изучен механизм микробной дегградации имзамокса с участием *Acinetobacter baumannii* IB5. Трансформация гербицида в данном случае происходит путём открытия имидазольного кольца. В результате микробной деструкции образуется продукт 5-гидроксиметил-3-альдегидпиридий, который по сравнению с исходным имзамоксом имеет более простое строение и меньшую токсичность [31, 32].

Многие штаммы бактерий, разлагающих имидазолиноновые гербициды, были выделены из образцов почвы, активного ила очистных сооружений и сточных вод, загрязнённых имидазолиноновыми гербицидами. Почвенные микроорганизмы превращают этот тип гербицидов в слабые полярные метаболиты и, в конечном счёте, в  $\text{CO}_2$ . Некоторые исследования показали, что бактериальные ассоциации значительно эффективнее осуществляют дегградацию гербицидов, чем индивидуальные штаммы. Большинство зарегистрированных изолятов способны разрушать один тип имидазолинонового гербицида. Интересно, что *Pseudomonas* sp. ИМ-4 способен разлагать различные имидазолиноновые гербициды. Так, имзапир сначала был превращён в пиазин-

карбоксамид, затем были удалены метильные, карбоксильные и изопропильные группы, и, наконец, имидазолиновое кольцо было разрушено и перегруппировано [33].

Биодеградация гербицидов в почве зависит от условий ОС, которые должны быть благоприятными для развития микробной популяции, ответственной за деградацию. Существует несколько факторов, влияющих на популяцию микроорганизмов-деструкторов – это температура и влажность почвы. Как низкая, так и избыточная влажность почвы может отрицательно сказаться на разложении гербицидов. Реакция имидазолиновых гербицидов на влажность почвы различна. Наиболее эффективное разложение гербицидов происходит в аэробных условиях. Различия во времени разложения гербицидов разными штаммами связаны с разной длительностью лаг-фазы, в течение которой происходит адаптация микроорганизмов и индукция ферментов. Продолжительность лаг-фазы, в свою очередь, может варьировать в зависимости от условий ОС, необходимых для развития деградирующих микроорганизмов, а также от самого гербицида. При быстром увеличении численности популяции микроорганизмов происходит более быстрое разложение гербицидов. Повторное применение одного и того же имидазолинового гербицида или структурно сходной молекулы, как правило, сопровождается его ускоренной биодеструкцией, что связано с адаптацией микроорганизмов к использованию данного соединения в качестве источника углерода [34].

Форма (анионная, нейтральная или катионная) и доступность имидазолиновых гербицидов в почве сильно зависит от рН из-за их амфотерной природы. Они находятся преимущественно в анионной форме при уровнях рН, характерных для многих сельскохозяйственных почв [8].

По мнению авторов [35], деградация имидазолинов в почве не всегда следует простой кинетике первого порядка (экспоненциальное снижение). Часто наблюдается двухфазная деградация, обычно с более быстрой начальной фазой, за которой следует более медленное снижение. В лабораторных исследованиях двухфазная деградация может объясняться снижением микробной активности, например, из-за ограниченных источников питательных веществ или углерода. В полевых исследованиях процессы на поверхности почвы, такие как фотолитиз или испарение, могут быть ответственны за быстрый начальный

распад, за которым следует более медленное снижение, когда соединение вымывается в более глубокие слои почвы с дождём или поливной водой. Кроме того, подчёркивается, что на скорость деградации влияют сезонные изменения температуры и влажности почвы. Ещё одной причиной двухфазной деградации, которая применима как к лабораторным, так и к полевым исследованиям, является снижение биодоступности, возникающее в результате нелинейной и зависящей от времени сорбции пестицидов. Более того, почва является довольно гетерогенной средой, и в деградации пестицидов участвуют различные микроорганизмы. В различных микрокомпартаментах деградация может происходить с разной скоростью, что в целом приводит к двухфазной или даже многофазной кинетике. Двухфазная деградация может также наблюдаться у хиральных соединений, так как в почве отдельные стереоизомеры зачастую разлагаются с разной скоростью.

Некоторые метаболиты при микробной деградации гербицидов оказываются более токсичными, чем исходные соединения. Данный факт необходимо учитывать при разработке биопрепаратов для ремедиации сельхозугодий. Изучение механизмов биодеградации гербицидов основано на идентификации их метаболитов с помощью современных физико-химических методов структурно-функционального анализа [24]. Подобные исследования сложны, трудоёмки и несомненно представляют и научный, и практический интерес. Так, предложены механизмы деградации метсульфурон-метила и трибенурон-метила [24]. Хромато-масс-спектрометрический анализ позволил идентифицировать по четыре основных метаболита деградации метсульфурон-метила и трибенурон-метила, два из которых – метил-2-(аминосульфонил)-бензоат и 1,2-бензизотиазол-3(2H)он-1,1-диоксид (сахарин) – являются общими для обоих представителей ряда сульфонилмочевин. Исследователи отмечают, что вышеназванные соединения адсорбируются компонентами различных типов почв по-разному, что вероятно, обуславливает разную степень подвижности метаболитов в почвенном горизонте и, следовательно, влияет на точность результатов мониторинговых исследований почв.

К настоящему времени описано несколько путей деградации гербицидов класса сульфонилмочевины и имидазолинов микроорганизмами. Так, двумя группами

исследователей показано, что разложение метсульфурон-метила бактериями происходит путём расщепления сульфонилмочевинного фрагмента. Бактерии *Ancylobacter* sp. продуцируют карбоксилэстеразы и деэтерифицируют метсульфурон-метил, тифенсульфурон-метил, бенсульфурон-метил до менее токсичных соединений. Предложен механизм деградации метсульфурон-метила почвенными бактериями, основными процессами которого являются гидроксирование бензольного кольца, расщепление сульфонилмочевинного фрагмента и деметилирование метилового эфира бензольного кольца [31]. Также был изучен механизм микробной деградации имазамокса с участием *Acinetobacter baumannii* IB5. Трансформация гербицида в данном случае происходит путём открытия имидазольного кольца. В результате микробной деструкции образуется продукт 5-гидроксиметил-3-альдегидпиримидин ( $C_7H_7NO_2$ ), который по сравнению с исходным имазамоksom ( $C_{15}H_{19}N_3O_4$ ) имеет более простое строение и меньшую токсичность [31].

Выявлена взаимосвязь между наличием ключевых катаболических генов, ответственных за деградацию пестицидов, и уровнем токсичности набора продуктов биотрансформации гербицидов ряда имидазолинонов, по сравнению с исходными веществами [36]. Установлено, что при обработке семян *Beta vulgaris* супернатантами жидких культур различных штаммов *Rhodococcus*, содержащих продукты микробного распада, а также растворы исходных имазапира и имазамокса, присутствует выраженный фитотоксический эффект. Однако выраженность фитотоксического коррелирует с наличием указанных генов: при их отсутствии подавление роста тест-растения значительно в связи с воздействием остаточных количеств имидазолинонов.

Таким образом, бактерии различных систематических групп могут эффективно трансформировать гербициды в менее токсичные формы и снижать их отрицательное действие на агробиоценозы.

### **Биоремедиация почв, загрязнённых имидазолинонами и сульфонилмочевинами. Применение биопрепаратов**

Обозначенные актуальные проблемы применения гербицидов на основе сульфонилмочевин и имидазолинонов без сомнения требуют адекватных мер по их предупреждению и устранению для поддержания экологической

безопасности и плодородия почв. Наиболее активно используют технологию очистки загрязнённых почв, при которой ряд агротехнических приёмов активизирует деятельность почвенных микроорганизмов. За счёт их жизнедеятельности происходит неспецифическая деструкция загрязнителей. Исследователями предлагается также применение протектантов, сорбентов, антидотов [19].

К новейшим технологиям снижения гербицидной нагрузки на почву относятся биотехнологии, предполагающие применение специально подобранных микроорганизмов-деструкторов и препаратов на их основе. Внесение подобных препаратов может иметь целью снижение гербицидного стресса для культивируемых растений [37] или ремедиацию сельхозугодий, загрязнённых остаточными количествами гербицидов. В первом случае речь идёт о применении РGP-бактерий, устойчивых к действию гербицидов и в их присутствии способных оказывать комплексное положительное воздействие на растение. Отличительной особенностью биоремедиации является применение микроорганизмов-деструкторов пестицидов, экологическая безопасность, высокая специфичность микробной деструкции и отсутствие токсических продуктов разложения [38].

В России практикуется целевая биоремедиация, при которой в загрязнённую почву вносят специально выращенную биомассу микроорганизмов-деструкторов. Для каждого типа загрязнителей используют специальные штаммы микроорганизмов, ранее выделенные из природы и поддерживаемые в лабораторных условиях. Для ремедиации загрязнённых территорий биологические технологии являются наиболее предпочтительными, вследствие своей экологической безопасности, низкой себестоимости работ и достаточно высокой эффективности [39].

При кажущейся простоте решения данной задачи возникает ряд трудностей. Во-первых, необходимо выделить технологичные микроорганизмы, во-вторых – подобрать условия их культивирования, в-третьих – правильно выбрать время, дозу и способ внесения биодеструкторов в почву, так как почва загрязняется неравномерно. Помимо всего перечисленного необходим контроль за интегральной токсичностью почвы, продукты деструкции загрязнителя не должны быть токсичны.

Наиболее эффективным способом поиска микроорганизмов-деструкторов является вы-

деление микробных изолятов из природных почв, длительно обрабатываемых сельскохозяйственными препаратами. Далее проводят селекцию микроорганизмов, способных наиболее активно разлагать в почве целевой поллютант. Важными критериями для селекционного отбора потенциальных биодеструкторов являются: неприхотливость микроорганизмов для культивирования, степень и сроки деструкции загрязнителя, интегральная токсичность почвы до и после микробной биоремедиации, фитотоксичность [40]. Отобранные штаммы микроорганизмов-деструкторов проверяют на безопасность для теплокровных животных. Только после комплекса лабораторных исследований приступают к испытаниям микроорганизмов в полевых условиях. По результатам химических анализов и оценки интегральной токсичности почвы до и после биоремедиации судят об эффективности проведённых работ. Это позволяет гарантировать безопасное применение в ОС микроорганизмов для очистки почв [41].

Многостадийность исследовательского процесса и сложности, возникающие при объективной оценке эффективности действия биопрепаратов, описанные выше, являются вероятно теми причинами, по которым подобные исследования зачастую не заканчиваются внедрением в практику. Имеются лишь единичные публикации о разработанных, сертифицированных и внедрённых биопрепаратах для устранения остаточных количеств сульфонилмочевин и имидазолинонов в почвах.

Белорусскими учёными из Института микробиологии НАН Беларуси разработан микробный препарат комплексного действия «Агроревитол». По данным разработчиков «Агроревитол» на 20–25% повышает всхожесть семян и защищает проростки от негативного воздействия гербицидов и других агрохимикатов; до 20% повышает урожайность сельскохозяйственных культур и улучшает качественные и количественные характеристики получаемой продукции; обогащает почву азотом и фосфором; способствует биоремедиации почвы, снижая остаточные количества гербицидов классов сульфонилмочевин и имидазолинонов в почве на 30%; подавляет развитие патогенной микрофлоры [41].

В состав препарата «Агроревитол» входят штаммы бактерий *Rhodococcus erythropolis* и *Rahnella aquatilis*, обладающие способно-

стью к деструкции гербицидов ряда сульфонилмочевин и имидазолинонов, фосфатмобилизующей и азотфиксирующей активностями, а также спорообразующие бактерии *Bacillus subtilis* с выраженными фитозащитными и ростстимулирующими свойствами. Количество жизнеспособных клеток бактерий в 1 см<sup>3</sup> препарата не менее 0,5 млрд [41]. Проведённые полевые испытания подтвердили эффективное воздействие препарата «Агроревитол» на формирование урожая пшеницы яровой и гороха полевого и разложение остаточных количеств гербицидов ряда сульфонилмочевин и имидазолинонов в почве. Применение препарата «Агроревитол» (норма расхода 4 л/га) позволяет получить прибавку урожая 2,2–6,2 ц/га (4,7–12,1%) пшеницы и снизить остаточные количества гербицидов группы имидазолинонов в почве на 5,8–17,9%. При использовании препарата на 40 сут в почве не обнаруживаются гербициды. Следует отметить, однако, что на российском рынке сельхозпрепаратов «Агроревитол» не представлен.

Российскими учёными запатентован штамм бактерий *Rhodococcus qingshengii* Ac-2143 – деструктор гербицида имазетапира и стимулятор роста растений [42]. В ходе экспериментальных исследований установлено, что микроорганизмы данного штамма способны за 7 сут утилизировать 23% имазетапира при культивировании на синтетической питательной среде с содержанием гербицида 50–100 мг/л. При внесении в почву без растений, искусственно загрязнённую гербицидами на основе имазетапира, культуры *R. qingshengii* Ac-2143 деградация д. в. гербицидов достигала 13,1%. При внесении с поливной водой под растения пшеницы степень деградации зафиксирована на уровне 5,7%. Кроме того, доказана способность *R. qingshengii* Ac-2143 продуцировать биологически активные вещества, стимулирующие рост и развитие растений в загрязнённом грунте. Указанные свойства *R. qingshengii* Ac-2143 позволяют применять его в качестве биопрепарата для ремедиации почв, загрязнённых имидазолинонами. Однако сведений о промышленном производстве и применении препарата на основе *R. qingshengii* Ac-2143 не найдено.

Российской компанией ООО «Бионова-тик» запатентован биодеструктор гербицидов «Restart» [43]. Микроорганизмы в составе биопрепарата обладают высокой способностью к биодеструкции химических гербицидов – имазетапир, имазамокс и хлорсульфурино-

вая кислота. Деструкция гербицидных остатков в почве ускоряется в 2–3 раза, что сокращает ограничения для последующих культур в севообороте. Препарат обладает ростостимулирующей активностью. Состав препарата: живые клетки штамма *Rhodococcus erythropolis* (титр не менее  $1 \cdot 10^9$  КОЕ/мл), препаративная форма – жидкость. По данным производителя, в зависимости от концентрации остаточных количеств гербицидов в почве, видимый эффект от применения препарата «Restart» проявляется по прошествии 21 сут после первого внесения в почву, стабильный эффект достигается по прошествии 21 сут после второго внесения в почву. Препарат действует в течение всего полевого сезона, при условии отсутствия источников повторного внесения гербицидов. Препарат снимает ограничения по севооборотам, после применения ИМ-подсолнечника и сои, обработанных имидазолинонами и сульфонилмочевинными препаратами. Единственная культура, которую не рекомендовано высевать на следующий год после применения имидазолинонов даже при условии применения препарата «Restart» – это сахарная свёкла. «Restart» доступен к приобретению, стоимость канистры ёмкостью 5 л – около 2 тыс. рублей.

### Заключение

Гербициды на основе сульфонилмочевин и имидазолинонов чрезвычайно востребованы современным растениеводством. Эти препараты характеризуются высокой избирательностью, относительно небольшими эффективными дозами, низкой токсичностью для теплокровных животных, умеренной персистентностью в почве. Их применение способствовало снижению общего тоннажа и норм расхода препаратов на 1–2 порядка. Однако в результате применения сульфонилмочевин и имидазолинонов в течение нескольких десятилетий обострилась проблема накопления остаточных количеств в почвах и влияния на чувствительные культуры севооборотов. Как следствие, существенное снижение урожайности из-за фитотоксического последствия, нарушения микробиоценозов и самоочищающей способности почв, невозможность использования сельхозугодий.

Для решения обозначенных проблем идёт активный поиск и разработка агротехнических и биотехнологических приёмов и технологий. На современном этапе развития биотехнологической отрасли перспективна

разработка биопрепаратов на основе активных штаммов-деструкторов остаточных количеств сульфонилмочевин и имидазолинонов. Разработка и внедрение подобных препаратов в технологии защиты растений при применении севооборотов позволит увеличить урожайность, получать экологичную продукцию, сохранять экологическую устойчивость почв и других компонентов биосферы, напрямую и косвенно связанных с ней.

### References

1. On the situation on the Russian and world market of fertilizers and crop protection products as of 29.03.2019 [Internet resource] [http://www.kaicc.ru/sites/default/files/o\\_situacii\\_na\\_rossiyskom\\_i\\_mirovom\\_rynke\\_udobreniy\\_i\\_szr\\_na\\_29.03.2019g.pdf](http://www.kaicc.ru/sites/default/files/o_situacii_na_rossiyskom_i_mirovom_rynke_udobreniy_i_szr_na_29.03.2019g.pdf) (Accessed: 02.02.2023) (in Russian).
2. Pileggi M., Pileggi S.A.V., Sadowsky M.J. Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities // *Heliyon*. 2022. V. 6. No. 12. Article No. e05767. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05767
3. Kolotova O.V., Mogilevskaya I.V., Nefedyeva E.E., Saneeva E.A. Bacterial degradation of agricultural fungicides // *Adv. of Medical Mycology*. 2022. V. 23. P. 212–217 (in Russian).
4. Kolotova O.V., Mogilevskaya I.V., Nefedieva E.E., Zheltobryukhov V.F. Obtaining effective biodestructors of fungicidal drugs for environmental agrobiocenoses' maintenance sustainability // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. V. 984. Article No. 032082. doi: 10.1088/1755-1315/984/3/032082
5. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V., Berezin G.I. Reaction of soil microbiota to pesticide action (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2012. No. 3. P. 4–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-3-004-018
6. Larina G.E., Spiridonov Yu.Ya., Shestakov V.G. The effect of physicochemical properties and the hydrothermal regime of soil on the detoxification of imidazolinone herbicides // *Agrochemistry*. 2003. No. 11. P. 78–84 (in Russian).
7. Kulikova N.A., Lebedeva G.F. Herbicides and ecological aspects of their application. Moskva: Librocom, 2010. 150 p. (in Russian).
8. Marinho M.I.C., Costa A.I.G., Vieira N.M., Paiva M.C.G., Freitas F.C.L., Silva A.A. Validation and application of a QuEChERS based method for estimation of half-life of imidazolinone herbicides in soils by LC-ESI-MS/MS // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. V. 167. P. 212–217. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.09.075
9. Aichele T.M., Penner D. Adsorption, desorption, and degradation of imidazolinones in soil // *Weed Technology*. 2005. V. 19. No. 1. P. 154–159. doi: 10.1614/WT-04-057R
10. Koutros S., Silverman D.T., Alavanja M.C., Andreotti G., Lerro C.C., Heltshe S., Lynch C.F., Sandler D.P.,

- Blair A., Beane Freeman L.E. Occupational exposure to pesticides and bladder cancer risk // *International Journal of Epidemiology*. 2016. V. 45. No. 3. P. 792–805. doi: 10.1093/ije/dyv195
11. Golombieski J.I., Sutili F.J., Salbego J., Seben D., Gressler L.T., da Cunha J.A., Gressler L.T., Zanella R., Vaucher Rde A., Marchesan E., Baldisserotto B. Imazapyr+imazapic herbicide determines acute toxicity in silver catfish *Rhamdia quelen* // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. V. 128. P. 91–99. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.02.010
12. Morokhovets V.N., Basay Z.V., Morokhovets T.V., Shterbolova T.V. Study of sensitivity of crops to soil residues of herbicides Pivot, Fabian, Lazurit and Proponit // *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2019. No. 3. P. 73–78 (in Russian). doi: 10.25808/08697698.2019.205.3.013
13. Ladan S.S. Phytotoxic follow-up imidazolinone on green manure and ways to reduce it // *Plodorodie*. 2021. No. 6. P. 78–83 (in Russian). doi:10.25680/S19948603.2021.123.22
14. Larina G.E. Structuring and analysis of information of ecotoxicological monitoring of herbicides // *Modern problems of science and education*. 2007. No. 12-1. P. 156–157 (in Russian).
15. Larina G.E., Spiridonov Yu.Ya., Zakharov S.A., Zakharova T.V. Estimation and prediction of phytotoxicity of sulfonylurea and imidazolinone herbicides // *Agrochemistry*. 2004. No. 4. P. 22–32 (in Russian).
16. Lukyanuk N.A. Regulation of herbicides application aftereffect with agricultural techniques in the link of beet crop rotation // *Arable Farming and Plant Breeding in Belarus*. 2020. No. 56. P. 28–39 (in Russian).
17. Stetsov G.Y. Aftereffects of herbicides in Western Siberia // *Zashchita i karantin rasteniy*. 2015. No. 3. P. 17–19 (in Russian).
18. Chkanikov N.D., Spiridonov Y.Y., Khalikov S.S., Muzafarov A.M. Antidotes for reduction of phytotoxicity of the residues of sulfonylurea herbicides // *INEOS Open*. 2019. V. 2. No. 5. P. 145–152 (in Russian). doi: 10.32931/io1921r
19. Spiridonov Yu.Ya. To the question on the after-effects of sulfonylurea herbicides in soils of the Russian Federation and ways to reduce their negative effect on cultivated plants // *Vestnik zashchity rasteniy*. 2009. No. 3. P. 10–19 (in Russian).
20. Variety of sulfonylurea herbicides and their after-effects in crop rotation [Internet resource] <https://www.agroxxi.ru/zrast/200804kk/200804kk.pdf> (Accessed: 11.10.2023) (in Russian).
21. Yavari S., Sapari N.B., Malakahmad A., Yavari S. Degradation of imazapic and imazapyr herbicides in the presence of optimized oil palm empty fruit bunch and rice husk biochars in soil // *Journal of Hazardous Materials*. 2019. V. 366. P. 636–642. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.022
22. Wu L., Gu Y.C., Li Y.H., Zhou S., Wang Z.W., Li Z.M. Synthesis, herbicidal activity, crop safety and soil degradation of pyrimidine- and triazine-substituted chlorsulfuron derivatives // *Molecules*. 2022. V. 27. No. 7. Article No. 2362. doi: 10.3390/molecules27072362
23. Thiour-Mauprivez C., Martin-Laurent F., Calvayrac C., Barthelmebs L. Effects of herbicide on non-target microorganisms: towards a new class of biomarkers? // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 684. P. 314–325. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.230
24. Leontev V.N., Akhramovich T.I., Ignatovets O.S., Lazovskaya O.I. Natural ways of the herbicide sulfonylurea degradation // *Proceedings of BSTU. Chemistry, technology of organic substances and biotechnology*. 2013. No. 4. P. 197–204 (in Russian).
25. Elias D., Bernot M.J. Effects of atrazine, metolachlor, carbaryl and chlorothalonil on benthic microbes and their nutrient dynamics // *PLoS One*. 2014. V. 9. No. 10. Article No. e109190. doi: 10.1371/journal.pone.0109190
26. Liwarska-Bizukoje E., Maton C., Stevens C.V. Biodegradation of imidazolium ionic liquids by activated sludge microorganisms // *Biodegradation*. 2015. V. 26. P. 453–463. doi: 10.1007/s10532-015-9747-0
27. Qian H., Lu H., Ding H., Lavoie M., Li Y., Liu W., Fu Z. Analyzing *Arabidopsis thaliana* root proteome provides insights into the molecular bases of enantioselective imazethapyr toxicity // *Scientific Reports*. 2015. V. 5. Article No. 11975. doi: 10.1038/srep11975
28. Griboff J., Morales D., Bertrand L., Bonansea R.I., Monferrán M.V., Asis R., Wunderlin D.A., Amé M.V. Oxidative stress response induced by atrazine in *Palaemonetes argentinus*: the protective effect of vitamin E // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2014. V. 108. P. 1–8. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.06.025
29. Dong W., Chen Q., Hou Y., Li S., Zhuang K., Huang F., Zhou J., Li Z., Wang J., Fu L., Zhang Z., Huang Y., Wang F., Cui Z. Metabolic pathway involved in 2-methyl-6-ethylaniline degradation by *Sphingobium* sp. strain MEA3-1 and cloning of the novel flavin-dependent monooxygenase system *meaBA* // *Applied and Environmental Microbiology*. 2015. V. 81. No. 24. P. 8254–8264. doi: 10.1128/AEM.01883-15
30. Wang X., Wang H., Fan D. Degradation and metabolism of imazapyr in soils under aerobic and anaerobic conditions // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2006. V. 86. No. 8. P. 541–551. doi: 10.1080/03067310500410730
31. Orlovskaya P.I., Mandryk-Litvinkovich M.N., Girilovich N.I., Stepanova T.L., Evdokimova O.V., Kalamiyets E.I. Bacteria-degraders of sulfonylurea and imidazolinone herbicides // *Microbial Biotechnology: fundamental and applied aspects: collection of scientific papers*. Minsk: Publishing House “Belarusian Science”, 2019. P. 549–560 (in Russian).
32. Liu C., Yang X., Lai Y., Lu H., Zeng W., Geng G., Yang F. Imazamox microbial degradation by common

clinical bacteria: *Acinetobacter baumannii* IB5 isolated from black soil in China shows high potency // Journal of Integrative Agriculture. 2016. V. 15. No. 8. P. 1798–1807. doi: 10.1016/S2095-3119(16)61344-8

33. Huang X., He J., Yan X., Hong Q., Chen K., He Q., Zhang L., Liu X., Chuang S., Li S., Jiang J. Microbial catabolism of chemical herbicides: microbial resources, metabolic pathways and catabolic genes // Pesticide Biochemistry and Physiology. 2017. V. 143. P. 272–297. doi: 10.1016/j.pestbp.2016.11.010

34. Bundt A.C., Avila L.A., Pivetta A., Agostinetto D., Dick D.P., Burauel P. Imidazolinone degradation in soil in response to application history // Planta Daninha. 2015. V. 38. No. 2. P. 341–349. doi: 10.1590/0100-83582015000200020

35. Buerge I.J., Bächli A., Kasteel R., Portmann R., López-Cabeza R., Schwab L.F., Poiger T. Behavior of the chiral herbicide imazamox in soils: pH-dependent, enantioselective degradation, formation and degradation of several chiral metabolites // Environmental Science and Technology. 2019. V. 53. No. 10. P. 5725–5732. doi: 10.1021/acs.est.8b07209

36. Kruglova M.N., Chugunova Y.A., Samkov A.A., Volchenko N.N., Khudokormov A.A. Correlation between the diversity of xenobiotic catabolism genes in *Rhodococcus* and phytotoxicity of products of biotransformation of imidazolinones and organophosphorus herbicides // Plants and microbes: the future of biotechnology: abstract book of the 2nd International Scientific Conference PLAMIC2020. Saratov: Association “Agrarian Education and Science”, 2020. P. 131–132 (in Russian).

37. Bakaeva M.D., Chetverikov S.P., Chetverikova D.V., Kendzhieva A.A. Promising microorganisms for coping

herbicide stress in plants // Plants and microbes: the future of biotechnology: abstract book of the 2nd International Scientific Conference PLAMIC2020. Saratov: Association “Agrarian Education and Science”, 2020. P. 32 (in Russian). doi: 10.28983/PLAMIC2020.032

38. Lazykin A.G., Leshchenko A.A., Ashikhmina T.Ya., Pogorelsky I.P., Darmov I.V., Lundovskikh I.A., Ustyuzhanin I.A., Sharov S.A. Assessment of the possibility of using plant-microbial associations in biotechnology of soil remediation at the facility “Maradykovskiy” // Theoretical and Applied Ecology. 2016. No. 4. P. 96–104 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2016-4-096-104

39. Zharikov G.A., Marchenko A.I., Kraynova O.A., Kapranov V.V., Zharikov M.G. Development and field trials of the technology for bioremediation of the territories contaminated by toxic chemicals // Extreme Medicine. 2013. No. 2. P. 41–51 (in Russian).

40. Kuznetsov A.E., Gradova N.B., Lushnikov S.V., Engelhar Mt. Applied ecobiotechnology. Moskva: Laboratoriya znaniy, 2015. 1164 p. (in Russian).

41. Kalamiyets E.I. Microbial biotechnologies as a base of ecologization and enhancement of productivity of agricultural production // Microbial Biotechnology: fundamental and applied aspects: collection of scientific papers. Minsk: Publishing House “Belarusian Science”, 2018. P. 3–11 (in Russian).

42. Muratova A.Y., Turkovskaya O.V. Strain of bacteria *Rhodococcus qingshengii* Ac-2143 – destructor of imazethapyr herbicide and stimulator of plant growth // RU 2 764 119 C1. Application: 2020139179, 27.11.2020. Publication date: 13.01.2022. Bull. 2 (in Russian).

43. Restart – biodegradable [Internet resource] <https://bionovatic.ru/catalog/restart> (Accessed: 02.02.2023).

## Реализация экологических проектов Госкорпорацией «Росатом»

© 2023. А. С. Петрова, директор по коммуникациям,  
ФГУП «Федеральный экологический оператор»,  
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 6,  
e-mail: ASePetrova@rosfeo.ru

Представлены ключевые проекты по ликвидации накопленного вреда окружающей среде в Ленинградской и Иркутской областях, реализацией которых занимается предприятие Госкорпорации «Росатом» Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологический оператор» (ФГУП «ФЭО»). Приведены основные технологические подходы, которые используются для реабилитации загрязнённых территорий на примере полигона «Красный Бор» в Ленинградской области, бывшего химического предприятия ООО «Усольехимпром» и Байкальского целлюлозно-бумажного комбината в Иркутской области. Проектные решения по ликвидации накопленного экологического вреда принимаются обоснованно, являются эффективными, надёжными и экологически безопасными. Отмечена необходимость повторного вовлечения реабилитированных территорий в хозяйственный оборот.

**Ключевые слова:** экологический проект, комплексные инженерные изыскания, загрязнённые территории, проекты по ликвидации накопленного экологического вреда, рекультивация, консервация и изоляция от окружающей среды, гидрогеологическое моделирование, создание промышленного кластера.

## Implementation of environmental projects by Rosatom State Corporation

© 2023. A. S. Petrova <sup>ORCID: 0009-0006-5646-8915</sup>,  
FSUE “Federal Ecological Operator”,  
6, Pyzhevsky Lane, Moscow, Russia, 119017,  
e-mail: ASePetrova@rosfeo.ru

Key projects to eliminate the accumulated environmental damage in the Leningrad and Irkutsk regions are presented. They are implemented by the Rosatom State Corporation enterprise, the Federal State Unitary Enterprise “Federal Environmental Operator” (FSUE “FEO”). The main technological approaches used for the remediation of contaminated areas on the example of the Krasny Bor landfill in the Leningrad region, the former chemical enterprise Usolyekhimprom LLC and the Baikal pulp and paper mill in the Irkutsk region are given. Design decisions to eliminate accumulated environmental damage are reasonable, effective, reliable and environmentally safe. The need to re-involve the remediated territories into economic circulation was noted.

**Keywords:** environmental project, comprehensive engineering surveys, contaminated areas, projects to eliminate accumulated environmental damage, remediation, conservation and isolation from the environment, hydrogeological modeling, creation of an industrial cluster.

В 2018 г. в России был дан старт одной из самых масштабных в мире экологических инициатив для кардинального улучшения экологической обстановки в России и, как следствие, повышения качества жизни её населения. Реализация инициативы была активно поддержана на государственном уровне, благодаря чему она приобрела статус национального проекта «Экология», и уже в 2019 г. в рамках нового нацпроекта были запущены первые «зелёные» программы.

В состав национального проекта «Экология» вошли 11 федеральных проектов по пяти ключевым экологическим направлениям: отходы, вода, воздух, биоразнообразие, технологии. Такой подход позволил более комплексно подойти к преодолению сформировавшихся в России экологических вызовов за счёт возможности создания целевых экологических проектов [1, 2].

Федеральное государственное унитарное предприятие «Федеральный экологиче-

ский оператор» (предприятие Госкорпорации «Росатом», сокращённо ФЭО) является активным участником национального проекта «Экология». С учётом накопленного научного и технического потенциала в части вывода из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов, предприятие отвечает за ликвидацию сложнейших объектов накопленного экологического вреда. К настоящему времени на территории нашей страны выявлено более 340 объектов, которые наносят непоправимый ущерб окружающей среде [3, 4]. Российским законодательством (ФЗ № 89) регламентируется деятельность по обращению с отходами, включающая сбор, обработку, утилизацию, обезвреживание, транспортировку и размещение отходов [5–7].

С 2019 г. ФЭО начал работы по рекультивации территории городской свалки в г. Челябинске [8, 9]. Были применены новые технологии по устройству системы сбора и очистки свалочного фильтрата с включением установок обратного осмоса, смонтирована система сбора и очистки поверхностного стока, применена современная технология по сбору и утилизации биогаза. В 2021 г. эти работы были завершены. Челябинская городская свалка – крупнейший объект размещения ТКО в Европе. Свалка эксплуатировалась 70 лет, за это время сформировалась гора мусора высотой более 40 м и площадью – свыше 74 га. Благодаря проведённым работам улучшилось качество жизни для более 1 млн человек, на 30% сократились выбросы вредных веществ в атмосферу города, полностью прекратились сбросы вредного фильтрата в р. Миасс. Тем самым снижены экологические риски, связанные с объектом накопленного вреда окружающей среде, уменьшился ущерб, наносимый природе при захоронении отходов. Территория сейчас полностью безопасна.

В рамках федеральных проектов «Чистая страна» и «Сохранение озера Байкал» с 2020 г. ФЭО реализует мероприятия по ликвидации накопленного экологического вреда на полигоне промышленных отходов «Красный Бор» в Ленинградской области, загрязнённой территории г. о. Усолье-Сибирское, включая промышленную площадку «Усольхимпрома», и трёх объектах бывшего Байкальского целлюлозно-бумажного комбината в Иркутской области [9–11]. Ещё одно предприятие Росатома – АО «Русатом Гринвэй» – с 2023 г. занимается рекультивацией Магнитогорской свалки в Челябинской области.

**Полигон «Красный Бор» в Ленинградской области.** Полигон токсичных промышленных отходов «Красный Бор» является одним из крупнейших мест размещения промышленных отходов на северо-западе нашей страны, куда они свозились без подробного изучения компонентного состава со всей территории бывшего Советского Союза и России. Полигон завершил свою деятельность в 2014 г. и к моменту закрытия там накопилось порядка 1,7 млн т опасных веществ. Ввиду расположения объекта менее чем в 30 км от г. Санкт-Петербурга и менее чем в 2 км от основной водной артерии города – р. Невы в случае возникновения внештатных ситуаций существуют потенциальные риски негативного воздействия на окружающую среду. Этим обусловлено включение полигона «Красный Бор» в федеральный проект «Чистая страна» и выделение на его ликвидацию финансирования из федерального бюджета [12].

Начиная с 2019 г. на территории полигона проводились комплексные инженерные изыскания, которые позволили выявить основные пути миграции и поступления загрязняющих веществ на близлежащие территории. Исходя из проведённого анализа, были определены три основных направления ликвидационных работ.

Прежде всего, требовалось изолировать территорию полигона от потока грунтовых вод, который был основным путём миграции загрязняющих веществ. Для решения этой задачи по периметру полигона возводится масштабная противофильтрационная завеса. Это сложное инженерное сооружение, которое включает в себя 4 гидроизоляционных барьера и систему автоматического мониторинга целостности, а также систему безопасности, позволяющую дистанционно восстанавливать целостность завесы в случае обнаружения локальных нарушений фильтрационных характеристик. Таким образом, после окончания строительства завесы территория полигона будет полностью и надёжно изолирована.

Второе направление рекультивации объекта – откачка и обезвреживание жидких и пастообразных производственных отходов из пяти открытых карт накопителей, общим объёмом 340 тыс. м<sup>3</sup>. Объём и характеристика размещённых в картах отходов потребовали создания специальной инфраструктуры с многоступенчатой технологией очистки жидких сред непосредственно на территории полигона. В основе лежит технология обратного осмоса,

которая подтвердила свою эффективность в работе с загрязнёнными жидкими отходами во время опытно-промышленных испытаний. Качество технологической цепочки, которая предусматривается в рамках проекта, позволяет достигать значений предельно допустимых концентраций для рыбохозяйственных водоёмов (ПДК<sub>р-х</sub>).

На третьем, завершающем этапе, территория «Красного Бора» будет укрыта многофункциональным рекультивационным экраном, что позволит перекрыть доступ атмосферных осадков с последующей инфильтрацией загрязняющих веществ через тело полигона. Это замкнёт его контур и надёжно изолирует бывший полигон от окружающей среды.

Работы по рекультивации объекта начались в апреле 2022 г. В 2023 г. осуществляется строительство противофильтрационной завесы и технологической инфраструктуры по откачке. В следующем году начнутся работы по откачке жидких отходов из открытых картнакопителей и их последующая очистка. Все работы по рекультивации должны быть завершены в 2025 г.

**Загрязнённая территория г. о. Усолье-Сибирское в Иркутской области.** Второй объект, на котором ФЭО ведёт работы по ликвидации накопленного вреда окружающей среде – бывшее предприятие ООО «Усольехимпром» в Иркутской области на берегу р. Ангары [13, 14] и загрязнённая территория г. о. Усолье-Сибирское. Этот самый масштабный сухопутный объект накопленного вреда на территории Российской Федерации, который состоит в реестре ГРОНВОС, результат многолетней деятельности химического гиганта советской промышленности. После прекращения эксплуатации предприятия «Усольехимпром» в 2017 г. площадь территории загрязнения составляла 1608 га, а объём накопленных отходов – 4,3 млн м<sup>3</sup>. Это сложносоставная локация, на которой находятся шламонакопитель, полигоны, очистные сооружения, недействующий водозабор и непосредственно территория производственной площадки «Усольехимпрома». Основная сложность, с которой столкнулись специалисты ФЭО при подготовке проектной документации, миграция загрязнённых грунтовых вод в реки Ангара и Белая и последующее распространение загрязнителей на более дальние дистанции. С учётом особенностей данного объекта при выборе проектных решений была создана сложная, обширная гидрогеологическая модель, определены направления движения

грунтовых вод, их скорость и залегание. Далее с помощью этой модели осуществлялась проработка различных сценариев ликвидации экологического вреда. По результатам гидрогеологического моделирования были выработаны два основных направления ликвидационных работ. Первое заключалось в ликвидации самих источников поступления загрязняющих веществ. Это более 300 зданий и сооружений промышленной площадки «Усольехимпрома», которые в настоящий момент уже почти полностью демонтированы, переработаны во вторичные инертные материалы и используются при рекультивации других объектов на территории Усольской площадки, в первую очередь, для засыпки шламонакопителя. В отношении шламонакопителя, полигона ТБО, канализационных очистных сооружений и части объекта водозабора р. Ангара было принято решение по консервации изоляции от окружающей среды. Эти меры достаточны для того, чтобы предотвратить поступление загрязняющих веществ от этих объектов в грунтовые воды.

Второе направление ликвидационных работ – более 90 млн м<sup>3</sup> грунта с глубиной залегания до 25 м в локальных точках. Проектной документацией предусмотрено новое, уникальное для РФ решение, разработанное специалистами ФЭО совместно с учёными из МГУ им. М.В. Ломоносова по созданию специальных сорбирующих завес общей протяжённостью 10,5 км. Они позволят предотвратить вынос загрязняющих веществ в р. Ангару и запустить механизм самоочистки грунтового массива под действием чистых грунтовых вод, движущихся с севера. Горизонт прогнозного моделирования в 100 лет наглядно показал, как постепенно локализуются основные загрязнения грунтов.

Работы на площадке предприятия «Усольехимпром» начались в 2020 г. с первоочередных противоаварийных мероприятий: был демонтирован цех ртутного электролиза, приведены в безопасное состояние аварийные технологические ёмкости с химическими веществами производства трихлорсилана и четырёххлористого кремния, скважины рассолопромысла с закаченными в них отходами производства, локализована подземная нефтяная линза вблизи водозабора р. Ангара. Проведённые мероприятия позволили снять острую угрозу для жителей города и окружающей среды.

На сегодняшний момент практически завершены монтажные работы зданий

и сооружений на производственной площадке «Усольехимпрома». Ведутся работы по формированию защитного слоя шламонакопителя площадью 200 га. В 2024 г. начнётся строительство пилотного участка сорбирующей завесы, которая должна подтвердить все проектные характеристики. Все работы проводятся в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности и охраны окружающей среды. Объект контролируют надзорные органы, а специалисты аккредитованной лаборатории Росприроднадзора регулярно проводят анализ атмосферного воздуха, почвы и воды сразу по нескольким показателям. Реабилитированные территории могут быть повторно вовлечены в хозяйственное использование для промышленного или рекреационного назначения. Например, на территории бывшего «Усольехимпрома» уже сегодня строится экотехнопарк по обезвреживанию и утилизации отходов I и II классов опасности, также там планируется создать современный промышленный кластер «зелёной химии». Так могут быть решены две задачи – экологическая и экономическая.

Ситуация с «Усольехимпромом» и другими аналогичными объектами стала основополагающей для создания одноимённого «Усольского закона» [2], который обязывает собственников особо опасных производств и объектов размещения отходов I и II классов опасности ликвидировать нанесённый экологический ущерб. За пять лет до конца срока эксплуатации объекта владелец должен разработать план мероприятий по ликвидации последствий негативного воздействия, который обязательно проходит государственную экологическую экспертизу. Выполнение всех мероприятий контролирует Росприроднадзор. Только при наличии заключения Росприроднадзора по итогам их выполнения объект можно исключить из реестра опасных производственных объектов, который контролируется Ростехнадзором. При невыполнении обязательств владелец объекта должен уплатить компенсационный платёж, в противном случае до уплаты компенсации или предоставления плана мероприятий по ликвидации вреда с положительным заключением государственной экологической экспертизы и соответствующим финансовым обеспечением, приостанавливается выплата дивидендов. Взысканные компенсационные платежи аккумулируются в федеральном бюджете и направляются на ликвидационные мероприятия по аналогичным объектам.

**Объекты Байкальского целлюлозно-бумажного комбината.** На территории Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, расположенного в непосредственной близости от озера Байкал – объекта Всемирного природного наследия [15–17], ФЭО является исполнителем работ по трём наиболее опасным для экологии Байкальской природной территории объектам. Это площадка центральных очистных сооружений (ЦОС) с щёлочесодержащими сточными водами, полигон «Бабхинский», на котором преимущественно находится зола от термической утилизации шламлигнина, и полигон «Солзанский», где накоплено более 4000 м<sup>3</sup> шламлигнина.

Объект находился в аварийном состоянии в связи с переполнением карт-накопителей полигонов «Солзанский» и «Бабхинский». В 2021 г. из-за риска перелива надшламовых вод из карт-накопителей и попадания опасных веществ в озеро Байкал на объекте был введён режим чрезвычайной ситуации. Для предотвращения этой острой угрозы был оперативно принят ряд мер: установлены локальные очистные сооружения, смонтированы инженерные сети, произведена перекачка и очистка надшламовых вод. За 2021 и 2022 гг. с помощью специально построенных локальных очистных сооружений было откачено и очищено 110 тыс. м<sup>3</sup> надшламовых вод, что позволило избежать экологической катастрофы.

По результатам опытно-промышленных испытаний, проведённых в 2021 г., перспективными для ликвидации накопленного вреда окружающей среде на территории полигона «Солзанский» были признаны технологии, основанные на методах компостирования и литификации. Однако результаты испытания этих технологий на образцах отходов одной из десяти карт полигона не позволили достичь гарантированного снижения класса опасности отходов до V класса. Учитывая сложный физико-химический и дисперсный состав отходов, размещённых в каждой из карт полигона, планируется проведение дополнительных исследований в форме отдельной НИОКР, которые должны быть завершены в течение 2,0–2,5 лет. По итогам этой большой научной работы в коллаборации с ведущими вузами и научными учреждениями страны будет выбрана оптимальная технология или технологии, после чего возобновится проектирование ликвидации накопленного экологического вреда на объекте.

На двух других объектах Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, площадке

ЦОС и полигоне «Бабхинский» проектные решения определены. В декабре 2022 г. проекты ликвидации накопленного вреда окружающей среде получили положительные заключения всех государственных экспертиз.

Центральные очистные сооружения характеризуются непосредственной близостью к Байкалу (менее 100 м от крайней точки), поэтому проектные решения по ликвидации накопленного экологического вреда принимались максимально эффективные, надёжные и экологически безопасные. Они предусматривают откачку и очистку щёлочесодержащей жидкости и осадка с помощью технологии многоступенчатой фильтрации с обратным осмосом на специально создаваемых под эту задачу локальных очистных сооружениях, а также демонтаж 89 зданий, сооружений и коммуникаций с дроблением образовавшихся после демонтажа строительных отходов и последующим размещением на специализированном полигоне за пределами Байкальской природоохранной территории. Далее предусмотрены технический и биологический этапы рекультивации, то есть все объекты и отходы, которые сейчас находятся на площадке цеха очистных сооружений, будут полностью удалены, и площадка будет приведена практически к первоначальному виду.

Рекультивация полигона «Бабхинский» предусматривает, в первую очередь, создание инфраструктуры для очистки и удаления 495 тыс. м<sup>3</sup> надшламовых вод методом многоступенчатой фильтрации с обратным осмосом. Надшламовые воды скопились на поверхности полигона из-за выпадения атмосферных осадков. Исходя из конфигурации объекта, было принято решение смонтировать блочно-модульные очистные сооружения, а не строить капитальную инфраструктуру. Технология многоступенчатой фильтрации была апробирована при проведении противоаварийных работ по понижению уровня надшламовых вод. После откачки и очистки надшламовых вод и ликвидации гидротехнических сооружений будет проведено укрытие поверхности полигона рекультивационным гидроизоляционным экраном с устройством системы дегазации, который предотвратит попадание атмосферных осадков в тело полигона и грунтовые воды. Таким образом, объект будет надёжно изолирован с точки зрения потенциального негативного воздействия.

До конца 2023 г. планируется завершить подготовительные работы на площадке ЦОС и полигоне «Бабхинский», включая строи-

тельство инженерных сетей и транспортной инфраструктуры, произвести заказ и изготовление основной части технологического оборудования для очистки щёлочесодержащих стоков, приступить к монтажу металлических каркасов возводимых зданий. В 2024 г. будет завершён монтаж технологического оборудования, его обвязка, начнётся подготовка к пуско-наладочным работам. Завершить весь комплекс работ по территории ЦОС планируется в 2027 г., по полигону «Бабхинский» – к концу 2026 г.

### Заключение

Являясь активным участником национального проекта «Экология», ФГУП «ФЭО» реализует проекты по ликвидации крупнейших в стране объектов накопленного вреда окружающей среде. Проводимые мероприятия призваны решить широкий спектр задач, включающих реконструкцию и строительство очистных сооружений с целью сокращения объёмов сбросов загрязнённых сточных вод, изоляцию объектов от потока грунтовых вод – основного пути миграции загрязняющих веществ, создание сложных инженерных сооружений (противофильтрационных эшелонированных и сорбирующих завес) по периметру объектов, рекультивацию загрязнённых территорий. К настоящему времени ФГУП «ФЭО» с использованием современных подходов и новейших технологий выполнен большой комплекс работ по ликвидации накопленного вреда окружающей среде на промышленных площадках бывших предприятий «Усольехимпром» и «Байкальский целлюлозно-бумажный комбинат» (Иркутская область), полигоне промышленных отходов «Красный бор» (Ленинградская область), рекультивирована Челябинская городская свалка. Накопленный ФГУП «ФЭО» опыт можно тиражировать на аналогичных объектах за рубежом, в первую очередь, в странах СНГ.

### Литература

1. Постановление Правительства РФ от 5 декабря 2019 г. № 1599 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Охрана окружающей среды» [Электронный ресурс] <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73086754/> (Дата обращения: 21.11.2023).
2. Федеральный закон от 30.12.2021 № 446-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об

охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112300043> (Дата обращения: 21.11.2023).

3. Соловьянов А.А., Чернин С.Я. Ликвидация накопленного вреда окружающей среде в Российской Федерации. М.: Наука РАН, 2017. 456 с.

4. Алыкова О.И., Чуйкова Л.Ю., Чуйков Ю.С. Накопленный экологический вред: проблемы и последствия. Сообщение 1. Государственный реестр ОНВОС // Астраханский вестник экологического образования. 2021. Т. 62. № 2. С. 88–113.

5. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 02.07.2024) «Об отходах производства и потребления» (с изм. и доп.) [Электронный ресурс] <https://base.garant.ru/12112084/> (Дата обращения: 21.11.2023).

6. Бабак Н.А., Макарова О.Ю. Обращение с отходами производства и потребления. СПб: ПГУПС, 2016. 38 с.

7. Пинаев В.Е., Чернышёв Д.А. Ликвидация накопленного экологического ущерба – организационные и правовые аспекты. М.: Мир науки, 2017. 136 с.

8. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 23.03.2019 № 501-р «Об определении ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами «РосРАО» единственным исполнителем осуществляемых в 2019 – 2020 годах закупок работ, услуг, связанных с рекультивацией территории городской свалки в г. Челябинске» [Электронный ресурс] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201903260019> (Дата обращения: 21.11.2023).

9. Лебедев А. Нам предстоит выстроить комплексную систему для безопасной работы с отходами 1 и 2 класса [Электронный ресурс] <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2021/03/19/112427> (Дата обращения: 06.10.2021).

10. Петрова А.С. Новые условия обращения с отходами I и II классов опасности. Перспективы для бизнеса и государства // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 203–209.

11. Шаванов Н.Д. Перспективные способы ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде (Байкальский регион) // Электронный научный журнал «Молодая наука Сибири». 2022. № 4 (18) [Электронный ресурс] <https://ojs.ircgups.ru/index.php/mns/article/view/544> (Дата обращения: 21.11.2023).

12. Постановление Правительства РФ от 13.10.2022 № 1818 «О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации «Охрана окружающей среды» [Электронный ресурс] <https://base.garant.ru/405461411/> (Дата обращения: 21.11.2023).

13. Starostina V. Yu. Assessment of territorial impact of industrial mercury pollution and proposal for its solution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. V. 687. No. 6. Article No. 066040.

14. Федосеев А.Н., Макарова А.С., Кушу А.Ю. Ремедиация грунтов, загрязнённых ртутьсодержащими

отходами // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 187–192.

15. Гордеева Е.М. Озеро Байкал как объект Всемирного природного наследия: актуальные вопросы международно-правовой охраны // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 230–236.

16. WHC/21/44.COM/7B State of conservation of properties inscribed on the World Heritage List [Электронный ресурс] <https://whc.unesco.org/archive/2021/whc21-44com-7b-en.pdf> (Дата обращения: 20.11.2023).

17. Качор О.Л., Паршин А.В., Трусова В.В. Комплексный подход к геоэкологической оценке объектов накопленного вреда // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 65–71.

## References

1. Resolution of the Government of the Russian Federation dated December 5, 2019 No. 1599 “On the introduction of changes in the state program of the Russian Federation “Environmental Protection” [Internet resource] <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/73086754/> (Accessed: 21.11.2023) (in Russian).

2. Federal Law of 30.12.2021 446-FZ “On Amendments to the Federal Law “On Environmental Protection” and Separate Legislative Acts of the Russian Federation” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202112300043> (Accessed: 21.11.2023) (in Russian).

3. Solovyanov A.A., Chernin S.Ya. Elimination of accumulated environmental damage in the Russian Federation. Moskva: Nauka RAN, 2017. 456 p. (in Russian).

4. Alykova O.I., Chuykova L.Yu., Chuykov Yu.S. Accumulated environmental damage: problems and consequences. Message 1. State registry of objects of accumulated environmental damage // Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya. 2021. V. 62. No. 2. P. 88–113 (in Russian). doi: 10.36698/2304-5957-2021-2-88-113

5. Federal Law of 24.06.1998 89-FZ (ed. dated 02.07.2021) “On the waste of production and consumption” (with amendments and additions) [Internet resource] <https://base.garant.ru/12112084/> (Accessed: 21.11.2023) (in Russian).

6. Babak N.A., Makarova O.Yu. Management of production and consumption waste. Sankt-Peterburg: PGUPS, 2016. 38 p. (in Russian).

7. Pinaev V.E., Chernyshyov D.A. Elimination of accumulated environmental damage – organizational and legal aspects. Moskva: Mir nauki, 2017. 136 p. (in Russian).

8. Order of the Government of the Russian Federation dated March 23, 2019 No. 501-r “On the definition of the FGUP “Radioactive Waste Management Enterprise «RosRAO” by the sole contractor of the procurement in 2019–2020 of works, services related to the restoration of the territory of the city dump in Chelyabinsk” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/>

View/0001201903260019 (Accessed: 21.11.2023) (in Russian).

9. Lebedev A. We have to build an integrated system for safe handling of class 1 and 2 waste [Internet resource] <https://www.atomic-energy.ru/interviews/2021/03/19/112427> (Accessed: 06.10.2021) (in Russian).

10. Petrova A.S. New conditions for handling wastes of I–II hazard classes. Prospects for business and government // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-203-209

11. Shavanov N.D. Promising ways to eliminate objects of accumulated environmental damage (Baikal region) // *The Electronic Scientific Journal “Young Science of Siberia”*. 2022. No. 4 (18) [Internet resource] <https://ojs.irgups.ru/index.php/mns/article/view/544> (Accessed: 06.10.2021) (in Russian).

12. Resolution of the Government of the Russian Federation dated October 13, 2022 No. 1818 “On the introduction of changes in the state program of the Russian Federation “Environmental Protection” [Internet resource] <https://base.garant.ru/405461411/> (Accessed: 21.11.2023) (in Russian).

13. Starostina V.Yu. Assessment of territorial impact of industrial mercury pollution and proposal for its solution // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 687. No. 6. Article No. 066040. doi: 10.1088/1757-899X/687/6/066040/

14. Fedoseev A.N., Makarova A.S., Kushu A.Yu. Remediation of territories contaminated with mercury waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 187–192 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-187-192

15. Gordeeva E.M. Lake Baikal as a natural World Heritage site: recent issues of protection under international law // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 230–236 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-230-236

16. WHC/21/44.COM/7B State of conservation of properties inscribed on the World Heritage List [Internet resource] <https://whc.unesco.org/archive/2021/whc21-44com-7B-en.pdf> (Accessed: 20.11.2023).

17. Kachor O.L., Parshin A.V., Trusova V.V. An integrated approach to the geocological assessment of accumulated damage objects // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 65–71 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-065-071

## Особенности создания систем автоматического контроля загрязняющих веществ от стационарных источников выбросов

© 2023. Н. М. Макарова, д. х. н., начальник отдела,  
А. Л. Балашов, к. х. н., директор по эксплуатации,  
А. М. Тойгильдин, главный специалист-эксперт,  
А. Г. Свирский, директор филиала,  
ФГУП «Федеральный экологический оператор»,  
119017, Россия, г. Москва, ул. Большая Ордынка, д. 24,  
e-mail: NatMiMakarova@rosfeo.ru

На современном этапе развития промышленности наблюдается тенденция по усилению экологического контроля за объектами, оказывающими негативное воздействие на окружающую среду (НВОС). Предприятия теплоэнергетической, чёрной и цветной металлургии, нефтегазоперерабатывающей, химической и нефтехимической промышленности оказывают наибольший вред окружающей среде, выбрасывая в атмосферу преимущественно диоксид серы, монооксид углерода, диоксиды азота, углеводороды, взвешенные вещества. Для осуществления контроля за количеством выбрасываемых загрязняющих веществ на законодательном уровне по объектам I категории НВОС установлено требование об обязательном оснащении стационарных источников выбросов системами непрерывного автоматического контроля (САК). Тематика внедрения САК является актуальной ввиду наличия в настоящее время ограниченного числа предприятий, имеющих САК. Целью исследования является рассмотрение особенностей создания САК стационарных источников выбросов, их состава, функционального назначения и внедрения на промышленных предприятиях.

**Ключевые слова:** система автоматического контроля, окружающая среда, загрязнение атмосферного воздуха, выбросы, промышленные предприятия.

## Features of creating systems for automatic control of pollutants from stationary sources of emission

© 2023. N. M. Makarova ORCID: 0000-0003-3113-4899, A. L. Balashov ORCID: 0009-0003-2253-0731,  
A. M. Toygildin ORCID: 0000-0001-6068-9119, A. G. Svirskiy ORCID: 0009-0002-1343-365X,  
FGUP "Federalnyj ekologicheskij operator",  
24, Bolshaya Ordynka St., Moscow, Russia, 119017,  
e-mail: NatMiMakarova@rosfeo.ru

At the present stage of industrial development, there is a tendency to strengthen environmental control over objects that have a negative impact on the environment (NIE). Enterprises of heat and power, ferrous and non-ferrous metallurgy, oil and gas processing, chemical and petrochemical industries cause the greatest harm to the environment by emitting mainly sulfur dioxide, carbon monoxide, nitrogen dioxide, hydrocarbons, suspended solids into the atmosphere.

In order to control the quantity of emitted pollutants at the legislative level it is mandatory to equip stationary emission sources of the 1<sup>st</sup> category objects of NIE with continuous automatic control systems (SAC). The implementation of the SAC is relevant due to the currently limited number of enterprises with SAC.

The aim of the study is to consider the features of the creation SAC of stationary sources of emissions, their composition, functional purpose and implementation in industrial enterprises.

**Keywords:** automatic control system, environment, atmospheric air pollution, emissions, industrial enterprises.

От последствий негативного воздействия выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) на организм человека ежегодно в мире погибает порядка 6 млн человек. В соответствии со

статистическими данными ежегодная доля выбросов ЗВ в атмосферу стационарными источниками в Российской Федерации (РФ) составляет около 17 млн т. Наиболее

распространёнными ЗВ, выбрасываемыми в атмосферный воздух стационарными источниками, по состоянию на 2021 г. являются: SO<sub>2</sub> (3,2 млн т), NO (1,9 млн т), CO (5,3 млн т) и углеводороды (без летучих органических соединений) (3,6 млн т) [1].

В целях снижения негативного воздействия и улучшения экологической обстановки в РФ органами государственной власти принимаются меры по регулированию и снижению выбросов ЗВ. К основным инструментам государственного регулирования в сфере охраны окружающей среды (ОС) относятся:

- издание нормативных правовых актов (НПА), регулирующих деятельность в области охраны ОС;
- выделение субсидий предприятиям, внедряющим экологически чистые технологии;
- квотирование выбросов;
- плата за негативное воздействие на ОС и установление повышающих коэффициентов за превышение установленных нормативов;
- проведение контрольно-надзорных мероприятий;
- привлечение к административной и уголовной ответственности за нарушения установленных требований в области охраны ОС;
- налоги на товары и производство, потребление или утилизация которых наносят ущерб ОС;
- внедрение наилучших доступных технологий (НДТ);
- профилактическая работа (информирование);
- формирование экологической ответственности у населения и работников предприятий.

В РФ все объекты, оказывающие негативное воздействие на ОС (НВОС), в зависимости от уровня их негативного воздействия подразделяются на четыре категории. В соответствии с критериями наибольшее НВОС оказывают объекты I категории, относящиеся к областям применения НДТ. В связи с оказанием объектами I категории НВОС значительного негативного воздействия Федеральным законом от 10.01.2002 № 7-ФЗ установлено требование об оснащении таких объектов системами непрерывного автоматического контроля (САК) при условии наличия в их составе стационарных источников выбросов ЗВ, образующихся при эксплуатации технических устройств, оборудования или их совокупности (установок), виды которых устанавливаются распоряжением Правительства РФ от 13.03.2019 № 428-р. Для объектов капитального строительства,

являющихся объектами НВОС I категории и относящихся к областям применения НДТ, при их архитектурно-строительном проектировании, строительстве и реконструкции неотъемлемым элементом является проектирование САК.

Перечень основных НПА, регламентирующих создание САК и предъявляемые к ней требования, представлен в таблице 1.

Целью данного исследования является рассмотрение особенностей создания САК стационарных источников выбросов, их состава, функционального назначения и внедрения на промышленных предприятиях.

### Особенности создания систем непрерывного автоматического контроля

Под САК понимается комплекс технических средств, обеспечивающих автоматические измерения и учёт показателей выбросов ЗВ, фиксацию и передачу информации о показателях выбросов ЗВ в государственный реестр объектов НВОС. Федеральным законом от 10.01.2002 № 7-ФЗ установлен запрет на ввод в эксплуатацию объектов капитального строительства, относящихся к объектам I категории НВОС, не оснащённых техническими средствами и технологиями, направленными на комплексное предотвращение и (или) минимизацию НВОС, не оснащённых средствами контроля за загрязнением ОС, в том числе автоматическими средствами измерения и учёта объёма или массы выбросов ЗВ и концентрации ЗВ, техническими средствами фиксации и передачи информации об объёме и (или) о массе выбросов ЗВ и их концентрации.

Вопросам оснащения стационарных источников выбросов САК посвящены статьи [2–4]. Авторами работы [5] обозначены технологические особенности внедрения САК. В работе [6] представлены результаты анализа технологического оборудования системы автоматизированного мониторинга дымовых газов тепловых электростанций. В статье [7] обобщены требования к внедрению САК.

Целью САК является обеспечение автоматического измерения и учёта показателей выбросов, фиксации и передачи информации об указанных показателях в государственный реестр объектов НВОС.

В соответствии с Федеральным законом от 10.01.2002 № 7-ФЗ для САК установлен срок их создания, который не должен превышать четыре года со дня получения или

Таблица 1 / Table 1

Нормативные документы, регламентирующие создание и требования к САК стационарных источников выбросов / Regulatory documents governing the establishment and requirements for the SAC of stationary emission sources

№ п/п	Нормативный документ Regulatory document	Основные сведения о САК стационарных источников выбросов / Basic information about the SAC of stationary emission sources
1	Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (пп. 3.1, 9,10 статьи 65)	Обязанность оснащения стационарных источников выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) на объектах I категории негативного воздействия САК. О программе, сроках и требованиях создания САК и включении программы создания САК или сведений о её наличии
2	Постановление Правительства Российской Федерации (РФ) от 13.03.2019 № 262 «Об утверждении правил создания и эксплуатации системы автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ»	Порядок создания и эксплуатации САК. Задачи, решаемые с помощью САК. Этапы создания САК. Условия включения стационарных источников выбросов в программу создания САК. Приёмка САК
3	Постановление Правительства РФ от 13.03.2019 № 263 «О требованиях к автоматическим средствам измерения и учёта показателей выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ, к техническим средствам фиксации и передачи информации о показателях выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду»	Виды автоматических средств фиксации и передачи информации о показателях выбросов ЗВ (автоматические средства). Назначение автоматических средств. Требования к техническим средствам. Измеряемые показатели. Пределы и погрешности измерений
4	Распоряжение Правительства РФ от 13.03.2019 № 428-р «Виды технических устройств, оборудования или их совокупности (установок) на объектах I категории, стационарные источники выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ которых подлежат оснащению автоматическими средствами измерения и учёта показателей выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду»	Перечень технических устройств, оборудования или их совокупности (установок) на объектах I категории, стационарные источники выбросов ЗВ которых подлежат оснащению автоматическими средствами измерения и учёта показателей выбросов ЗВ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов ЗВ
5	Приказ Росприроднадзора от 25.08.2022 № 382 «Об утверждении формата передачи данных о показателях выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ по информационно-телекоммуникационным сетям с автоматических средств измерения и учёта показателей выбросов загрязняющих веществ и (или) сбросов загрязняющих веществ в технические средства фиксации и передачи информации в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду»	Формат передачи HTTP запроса автоматических средств измерения и учёта показателей выбросов ЗВ в государственный реестр объектов НВОС, а также в ПТО УОНВОС, JSON структуры набора элементов или полей данных. Формат передачи HTTP ответа ПТО УОНВОС в АСИ JSON структуру набором элементов или полей данных. Формат передачи типов данных, единиц измерения и кодов показаний.

№ п/п	Нормативный документ Regulatory document	Основные сведения о САК стационарных источников выбросов / Basic information about the SAC of stationary emission sources
6	ГОСТ Р 8.958-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Наилучшие доступные технологии. Автоматические измерительные системы для контроля вредных промышленных выбросов. Методы и средства испытаний»	Ввод в эксплуатацию АИС КВ. Требования к подготовке к испытаниям АИС КВ. Средства измерения при проведении испытаний АИС КВ. Требования безопасности при проведении испытаний АИС КВ. Методы испытания АИС КВ. Проверка и определение параметров АИС КВ. Оценка защиты и идентификации программного обеспечения. Анализ конструкции АИС КВ
7	ГОСТ Р 8.959-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Наилучшие доступные технологии. Автоматические измерительные системы для контроля вредных промышленных выбросов. Методика поверки»	Общие требования поверки АИС КВ. Операции поверки АИС КВ. Средства и методы поверки АИС КВ. Требования безопасности АИС КВ. Условия поверки АИС КВ. Подготовка к поверке АИС КВ. Проведение поверки АИС КВ. Оформление результатов поверки АИС КВ
8	ГОСТ Р 8.960-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Наилучшие доступные технологии. Метрологическое обеспечение автоматических измерительных систем для контроля вредных промышленных выбросов. Основные положения»	Элементы и процесс метрологического обеспечения измерений. Установление и нормирование метрологических характеристик. Метрологическая экспертиза АИС КВ. Испытания в целях утверждения типа средств измерений. Поверка и калибровка АИС КВ. Метрологический надзор АИС КВ
9	ГОСТ Р ИСО 10396-2012 «Выбросы стационарных источников. Отбор проб при автоматическом определении содержания газов с помощью постоянно установленных систем мониторинга»	Методы отбора проб отходящих газов при САК. Ограничения применимости стандарта. Руководство по проведению представительного отбора проб газов в газоходе. Характеристика источника выбросов. Определение места отбора проб. Аппаратура и оборудование. Описание функционирования системы. Содержание протокола отбора проб
10	ИТС 22.1-2021 «Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения»	Принципы создания и эксплуатации систем автоматического контроля выбросов в рамках ПЭК

пересмотра комплексного экологического разрешения. Для реконструируемых стационарных источников, включённых в программу повышения экологической эффективности, сроки оснащения САК определяются сроками реализации мероприятий данной программы. Оснащение стационарных источников выбросов САК осуществляется на основании программы по их созданию, являющейся составной частью программы производственного экологического контроля, в которой определяются стационарные источники и показатели выбросов ЗВ, подлежащие автоматическому контролю, места и сроки установки автоматических средств измерения и учёта показателей выбросов ЗВ, а также технических средств фиксации и передачи информации о показателях выбросов ЗВ в государственный реестр объектов НВОС, состав и форма передаваемой информации.

Процесс создания САК для каждого предприятия индивидуален. Это связано с тем, что

даже при общем подобии технологических процессов каждое конкретное предприятие имеет свои индивидуальные конструктивные особенности и производственное назначение. Вместе с тем для установления единого порядка создания и эксплуатации САК постановлением Правительства РФ от 13.03.2019 № 262 утверждены правила по их созданию и эксплуатации (Правила), которыми устанавливаются: задачи и этапы создания САК, требования к содержанию и разработке программы создания САК, условия включения источников НВОС в программу создания САК, требования к проектированию САК.

Согласно Правил процесс создания САК включает в себя несколько этапов: определение стационарных источников и показателей выбросов, подлежащих контролю автоматическими средствами измерения, их предпроектное обследование; разработка и утверждение программы создания САК; проектирование САК; поставка и монтаж оборудования, не-

обходимого для создания САК; приёмка САК в эксплуатацию; ввод в эксплуатацию САК.

К основным требованиям, предъявляемым к САК, относятся обеспечение её работы в непрерывном, автоматическом и круглосуточном режиме с использованием прямых инструментальных методов, соответствующих законодательству в области обеспечения единства измерений. Функционал, осуществляемый САК, включает в себя:

- измерение мгновенных выбросов ЗВ атмосферу;
  - приём измеренных мгновенных и интегральных значений выбросов от других источников;
  - расчёт мгновенных и интегральных значений выбросов от технологических установок и в целом по предприятию;
  - отображение значений выбросов и технологических параметров на мониторах АРМ эколога в режиме реального времени;
  - ведение оперативных архивов полученных и рассчитанных параметров, построение трендов, создание отчётов;
  - предоставление данных по выбросам и технологическим параметрам специалистам предприятия в виде видеокладов и трендов (web-интерфейс) и в виде текущих и архивных значений (ODBC-интерфейс, SOAP web-сервис);
  - передача в автоматизированные системы управления технологическим процессом или оператору технологических установок информации о превышении предаварийных/аварийных параметров для принятия неотложных мер по уменьшению выбросов;
  - передача данных по выбросам в Росприроднадзор посредством государственного реестра объектов НВОС.
- При определении стационарных источников и показателей выбросов, подлежащих контролю с помощью САК, проводится:
- сбор и анализ информации о составе и показателях выбросов стационарными источниками выбросов;
  - выбор стационарных источников выбросов, подлежащих оснащению автоматическими средствами измерения, а также средствами фиксации;
  - определение технической возможности осуществления автоматического контроля в условиях эксплуатации выбранных стационарных источников выбросов;
  - определение для каждого стационарного источника, подлежащего оснащению автоматическими средствами измерения, показате-

лей выбросов, подлежащих автоматическому контролю;

- определение методик, приборов и оборудования по измерению показателей выбросов;
- определение мест установки средств измерений в газоходах с отходящими газами в соответствии с требованиями промышленной безопасности, а при отсутствии отраслевых национальных стандартов по выбору измерительных секций и мест измерений для конкретной отрасли промышленности – в соответствии с национальным стандартом РФ ГОСТ Р ЕН 15259-2015 «Качество воздуха. Выбросы стационарных источников. Требования к выбору измерительных секций и мест измерений, цели и плану измерений, и составлению отчёта».

Для управления аппаратной частью САК предусмотрено создание программного обеспечения, позволяющего проводить в непрерывном режиме расчёт химических и физических показателей, анализ поступающей от приборов информации, архивирование и систематизацию данных, передачу данных в автоматизированные системы более высокого уровня, сохранение результатов измерений и учёта информации с регистрацией времени и даты остановки и возобновления работы автоматических средств измерения и передачи информации в государственный реестр объектов НВОС.

Требования к формату передачи данных о показателях выбросов ЗВ по информационно-телекоммуникационным сетям с автоматических средств измерения и учёта показателей выбросов ЗВ в технические средства фиксации и передачи информации в государственный реестр объектов НВОС установлены приказом Росприроднадзора от 25.08.2022 № 382. Передача информации в государственный реестр объектов НВОС о результатах измерений выбросов осуществляется усреднённо за каждые 20 или 30 мин.

#### **Состав и функциональное назначение систем непрерывного автоматического контроля**

Условно САК можно разделить на два уровня: нижний уровень – автоматическая система измерений на источниках выбросов, первичная обработка полученной информации и передача результатов измерений и вычислений на верхний уровень; верхний уровень – серверное оборудование, оснащён-

ное специальным программным обеспечением и сеть автоматизированных рабочих мест (АРМ) пользователей [8].

Требования к используемым в САК автоматическим средствам измерения и учёта показателей выбросов ЗВ, а также техническим средствам фиксации и передачи информации о показателях выбросов ЗВ в государственный реестр объектов НВОС определены постановлением Правительства РФ от 13.03.2019 № 263. Кроме того, установлены виды автоматических средств измерений, их максимально допустимые погрешности, требования к периодичности передачи информации о результатах измерений техническими средствами фиксации и передачи информации, требования к программному обеспечению технических средств фиксации и передачи информации, а также срокам хранения информации, полученной от автоматических средств измерений.

Обязательные метрологические требования к измерениям при осуществлении деятельности в области охраны ОС, включая диапазон и пределы допустимой погрешности, указаны в перечне измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, утверждённом постановлением Правительства РФ от 16.11.2020 № 1847.

В качестве основных недостатков средств измерений САК, влияющих на результаты измерений, можно выделить следующее:

- не нормируемость суммарной погрешности САК в рабочих условиях;
- отсутствие учёта дополнительной погрешности измерений, вызываемой пробоотборными устройствами и системами подготовки пробы;
- использование средств измерений с устаревшими и ненадёжными методами измерений, имеющими большой цикл измерений (не отвечающих требованиям непрерывности), использующие не прямые измерения с восстановлением или окислением компонента и не имеющие нормированной погрешности;
- физические изменения состава пробы при применении систем подготовки пробы с охлаждением и осушкой, что, в свою очередь, влияет на достоверность результатов анализа;
- использование бинарных стандартных образцов, а не многокомпонентных газовых смесей, в качестве средств для поверки и калибровки средств измерений;
- отсутствие учёта дополнительной погрешности систем пробоотбора, транспор-

тировки и подготовки пробы при подаче парогазовых смесей непосредственно в газоанализатор, а не в пробоотборный зонд [9, 10].

Выбор мест установки средств измерений осуществляется на этапе проектирования, при этом необходимо руководствоваться следующими рекомендациями: места установки должны отвечать требованиям по соблюдению определённого режима газового потока в измерительной плоскости (отсутствие завихрений и обратных потоков, иметь заданный и стабильный профиль потока, позволяющий определить его скорость и массовую концентрацию ЗВ); однородность анализируемого газового потока; возможность создания специализированных площадок обслуживания для доступа к приборам; возможность врезки фланцев; возможность подсоединения электропроводов, наличие сжатого воздуха, линии водоснабжения и водоотведения; обеспечение безопасных условий труда; предотвращение негативного воздействия на ОС; обеспечение лёгкого доступа к средствам измерения.

Монтаж средств измерений осуществляется на стационарных источниках выброса промышленных установок или на подводящих газоходах к дымовым трубам. В случае выбросов ЗВ несколькими промышленными установками через один стационарный источник выбросов местом установки средств измерений и учёта являются газоходы всех промышленных установок или сам стационарный источник выбросов.

Вместе с тем, при выборе мест установки средств измерений возникают некоторые сложности, связанные со следующими факторами: проблематичность соблюдения требований к прямым участкам при установке расходомеров и анализаторов пыли на больших по диаметру дымовых трубах; необходимость согласования врезок на дымовых трубах и строительства площадок обслуживания; проведение высотных работ; часто встречающееся высокое содержание твёрдых частиц (сажи, пыли), осаждающееся на установленном оборудовании; низкая плотность среды; низкая скорость газового потока; высокая температура.

Для проведения измерений ЗВ с помощью САК используются методы, указанные в ИТС НДТ 22.1-2021 (табл. 2).

Среди представленных методов наиболее широкое распространение получили: хемилюминесценция, недисперсионная инфракрасная спектроскопия и Фурье-

Таблица 2 / Table 2

Перечень основных методов измерения, применимых при создании САК выбросов загрязняющих веществ / List of basic measurement methods applicable when creating SAC of pollutant emissions

Загрязняющее вещество Pollutant	Способ контроля Control method
Аммиак (NH <sub>3</sub> )	Фурье-спектроскопия, недисперсионный инфракрасный сенсор (ИК-сенсор) с корреляционным газовым фильтром, диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия
Углерода оксид (CO) как показатель полноты сгорания топлива	Фурье-спектроскопия, недисперсионный ИК-сенсор с корреляционным газовым фильтром, электрохимия*
Углерода оксид (CO) во всех остальных случаях	Фурье-спектроскопия, недисперсионный ИК-сенсор с корреляционным газовым фильтром, электрохимия*
Хлористый водород (HCl)	Фурье-спектроскопия, недисперсионный ИК-сенсор с корреляционным газовым фильтром, диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия
Фтористый водород (HF)	Фурье-спектроскопия, диодно-лазерная абсорбционная спектроскопия, дифференциальная оптико-абсорбционная спектроскопия
Оксиды азота (сумма азота оксида и азота диоксида, (NO <sub>2</sub> и NO))	Хемилюминесценция, фурье-спектроскопия, недисперсионный ИК-сенсор с корреляционным газовым фильтром, недисперсионная УФ спектроскопия, дифференциальная оптико-абсорбционная спектроскопия, электрохимия*
Кислород (O <sub>2</sub> )	Парамагнитный метод, циркониевый датчик, электрохимия
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	Фурье-спектроскопия, недисперсионный ИК-сенсор с корреляционным газовым фильтром, недисперсионная УФ спектроскопия, дифференциальная оптико-абсорбционная спектроскопия
Сероводород (H <sub>2</sub> S)	Фурье-спектроскопия, недисперсионный ИК-сенсор с корреляционным газовым фильтром, недисперсионная УФ спектроскопия, дифференциальная оптико-абсорбционная спектроскопия

Примечание: \* – метод применим только для электростанций, в которых природный газ является основным видом топлива.

Note: \* – the method is applicable only for power plants with natural gas as the main fuel.

спектроскопия. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье является одной из самых надёжных и эффективных технологий для автоматического мониторинга выбросов, позволяющая одновременно измерять несколько газообразных компонентов. Например, газо-анализатор ЭкоСпектр-Ф (изготовитель ООО «НПО «Экохимприбор»), предназначенный для непрерывного измерения содержания различных компонентов газовых смесей в промышленных выбросах, таких как NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>O, HCl, HF. Гибкость и универсальность инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье делают её экономически выгодным и многоцелевым инструментом для измерения широкого спектра газовых компонентов в различных промышленных процессах, требующих непрерывного газового мониторинга.

В зарубежных промышленно развитых странах большое внимание уделяется контро-

лю за загрязнением атмосферного воздуха, для осуществления которого ими приняты НПА, ограничивающие выбросы ЗВ в атмосферный воздух, а также созданы САК. В частности, Директивой Европейского парламента и Совета Европейского Союза от 24.11.2010 № 2010/75/ЕС «О комплексном предотвращении загрязнения и контроле над ним, новая редакция», установлены ограничения по выбросам ЗВ от промышленных предприятий и требования по их непрерывному контролю. Все установки, подпадающие под действие вышеуказанной директивы, должны предотвращать и сокращать загрязнение путём применения НДТ и обеспечивать эффективное использование энергии, управление отходами, а также меры по предотвращению аварийных ситуаций и ограничению их последствий. Также в Европейских странах установлены общие стандарты для непрерывных измерений качества воздуха с помощью автоматизированных из-

мерительных систем EN 15267-1, EN 15267-2, EN 15267-3, EN 14181.

В настоящее время в РФ при создании САК используется как российское, так и зарубежное оборудование (пылемер Dusthunter SB100, ультразвуковой расходомер Flowsic100H, термопреобразователь Sitrans7MC7512, преобразователь давления Sitrans7MF4233).

Для осуществления контроля ЗВ российскими предприятиями, такими как ФГУП «СПО «Аналитприбор», ООО «Н.П.Т.О. Экоприбор», ООО «НТЦ «Промприбор», АО НИЦ «Автоматика», ООО «Информаналитиа» и др. разработаны отечественные средства измерения, позволяющие определять в непрерывном режиме следующие вещества: NO, NO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, Br<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>, NaOH, H<sub>2</sub>S, C<sub>6</sub>H<sub>11</sub>NO, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>, CH<sub>3</sub>SH, CH<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>OH, C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, метилметакрилат, пыль, стирол, уайт-спирит, бензин, гексан, керосин, углеводороды C<sub>1</sub>-C<sub>5</sub> (по метану), углеводороды C<sub>1</sub>-C<sub>10</sub> (по гексану), углеводороды C<sub>6</sub>-C<sub>10</sub> (по гексану), CO<sub>2</sub>, CO, C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH, CH<sub>2</sub>O, HF, Cl<sub>2</sub>, HCl, SF<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>, C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, и т.д. Однако, по ряду ЗВ (бензапирен, диоксины, тяжёлые металлы и др.) отсутствуют средства непрерывного измерения, применяемые в САК.

Из широкого спектра определяемых веществ в основном отечественными организациями в рамках САК предоставляются услуги по контролю следующих показателей: NO, NO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, HF, HCl, взвешенных веществ, скорость потока, давление, температура, содержание кислорода и влажность отходящих газов.

Вместе с тем, в связи с введёнными в отношении РФ санкциями возникли трудности с приобретением ряда оборудования, используемого в САК. Для решения данной проблемы отечественные организации, занимающиеся созданием САК, переориентировались на приобретение аналогичного оборудования у дружественных стран (Китай, Индия и т.д.). Также стоит отметить, что намечена тенденция на использование при создании САК и их техническом обслуживании только средств и оборудования отечественного производства.

За невыполнение или несвоевременное выполнение требований по оснащению стационарных источников выбросов ЗВ САК, а также за нарушение требований к их оснащению ст. 8.51 Кодекса РФ об административных правонарушениях предусмотрено наложение штрафов.

### Применение САК на производственно-технических комплексах по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности (ПТК)

В соответствии с паспортом федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» в составе национального проекта «Экология» в 2024–2026 гг. планируется ввод в эксплуатацию ПТК в нескольких регионах нашей страны. Создаваемые ПТК будут представлять собой высокотехнологичные производственные комплексы, надёжные технологические решения которых будут соответствовать лучшему мировому опыту со всей необходимой инфраструктурой и современным оборудованием, позволяющими безопасно реализовать задачи по обработке, утилизации и обезвреживанию промышленных отходов I и II классов опасности, образующихся в регионах их расположения [11].

На ПТК обезвреживание отходов I и II классов опасности планируется осуществлять с помощью установки термического обезвреживания, которая в соответствии с распоряжением Правительства РФ от 13.03.2019 № 428-р входит в перечень оборудования, подлежащего оснащению автоматическими средствами измерения и учёта показателей выбросов ЗВ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации о показателях выбросов ЗВ в государственный реестр объектов НВОС. Для объектов НВОС, осуществляющих утилизацию и обезвреживание отходов, в том числе термическими способами, приказом Минприроды России от 12.11.2021 № 844 установлены технологические показатели выбросов ЗВ в атмосферный воздух, соответствующие НДТ.

Для контроля соблюдения технологических показателей выбросов на ПТК в составе установки термического обезвреживания отходов предусмотрена установка комплектно поставляемой САК компании ООО «СМЗ». Согласно паспорта на САК и проектной документации на строительство ПТК данная система предназначена для непрерывного автоматического измерения температуры; абсолютного давления и объёмного расхода газового потока; концентраций CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF, HCl, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, твёрдых (взвешенных) частиц; расчёта массовых и валовых выбросов ЗВ; сбора, обработки, визуализации, хранения полученных данных, представления полученных результатов в различных форматах [12, 13]. Остальные показатели будут кон-

тролироваться инструментальными методами в аккредитованной лаборатории.

Принцип действия САК, используемой на ПТК, основан на следующих методах измерения:

- температура газового потока – термоэлектрический;
- абсолютное давление газового потока – тензорезистивный;
- скорости газового потока – ультразвуковой;
- массовая концентрация твёрдых веществ – оптический;
- объёмная доля кислорода (O<sub>2</sub>) – ячейка на базе оксида циркония;
- массовая концентрация CO, NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, HF, HCl, объёмная доля паров воды – инфракрасная Фурье-спектроскопия.

Создаваемая САК входит в состав системы ежегодного комплексного экологического мониторинга, который планируется осуществлять на ПТК.

### Заключение

Таким образом, внедрение САК в значительной степени снижает риски получения штрафов, облегчает процедуру получения комплексных экологических разрешений, улучшает экологическую ситуацию не только на территории предприятия, но и на прилегающей территории, снимает социальную напряжённость населения за счёт открытости и доступности данных о выбросах, способствует предотвращению превышений нормативов допустимых выбросов, повышает эффективность предприятий, способствует оптимизации технологических процессов, снижению налоговой нагрузки за выбросы (как правило, фактические значения валовых выбросов ЗВ в 1,5–2 раза ниже расчётных).

### References

1. Environmental protection in Russia. Statistical collection of Rosstat / Eds. I.V. Vasiliev, E.N. Glushakova, V.V. Dmitriev, S.S. Drozdova, T.R. Zhemchugova, M.P. Klevakina, M.G. Kotlyakova, E.A. Kuzmina, S.V. Ledovskaya, R.V. Nekrasov, I.V. Novikova, O.N. Romanova, N.G. Rybalsky, I.V. Sukhova, O.V. Kharina. Moskva, 2022. 115 p. (in Russian).
2. Sergeechev V.V., Panarin V.M., Rybka N.A. Equipping emission sources with automatic controls // *Ekologiya proizvodstva*. 2020. No. 12 (197). P. 108–109 (in Russian).

3. Grishakov K.V., Panarin V.M., Goryunkova A.A. Development of automated systems monitoring of air pollution of the gas and chemical industry // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. 2015. No. 8. Part 2. P. 44–50 (in Russian).

4. Panarin M.V., Rybka N.A., Maslova A.A., Sergeechev V.V., Zagumennov I.Yu. Equipment of stationary sources of harmful (pollutant) substances with automatic means of control of industrial emissions of objects of the 1st category // *Measuring, Monitoring, Management, Control*. 2019. No. 4 (30). P. 12–20 (in Russian).

5. Maksimov V.V. Systems of continuous emission control // *Ekologiya proizvodstva*. 2018. No. 11 (172). P. 48–57 (in Russian).

6. Kovalev I.V., Kovalev D.I., Kolesnik V.V., Losev V.V., Karaseva M.V. technological equipment Analysis of automated monitoring systems of flue gases at power plants // *Siberian Journal of Science and Technology*. 2018. V. 19. No. 4. P. 683–690 (in Russian). doi: 10.31772/2587-6066-201819-4-683-690

7. Ermakova M.S. Creation of an automatic emission and discharge control system // *Ekologiya proizvodstva*. 2020. No. 8 (193). P. 88–96 (in Russian).

8. Berner L.I., Tolstykh A.V., Zeldin Yu.M., Stanislavchik K.V., Khadeev A.S., Kotov V.V. Automated emission control system. Building, function and implementation principles // *Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*. 2021. No. 1. P. 29–35 (in Russian). doi: 10.47501/ITNOU.2021.1.29-35

9. Malyavin A.S. Actual issues of creation of systems of automatic control of emissions and discharges at facilities of category the 1<sup>st</sup> [Internet resource] [https://eipc.center/wp-content/themes/fgau/publics/malyavin\\_creating\\_automatic%D0%B2.pdf?ysclid=lpfcz6na17323301514](https://eipc.center/wp-content/themes/fgau/publics/malyavin_creating_automatic%D0%B2.pdf?ysclid=lpfcz6na17323301514) (Accessed: 19.10.2023) (in Russian).

10. The system of automatic control emissions KEY. SYSTEM [Internet resource] <https://arctex.ru/content/arktehkeh> (Accessed: 19.10.2023) (in Russian).

11. Petrova A.S. New conditions for handling wastes of I–II hazard classes. Prospects for business and government // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4304-2021-4-203-209

12. Project documentation “Industrial and technical complex for processing, utilization and neutralization of waste of hazard classes I and II “Gorny””. Section 8. Environmental protection measures, code 116.4-01-OOS1.1.3. Moskva: JSC “GSPI”, 2022. (in Russian).

13. Project documentation “Industrial and technical complex for processing, disposal and neutralization of waste of hazard classes I and II “Shchuchye””. Section 8. Environmental protection measures, code 116.4-01-OOS1.1. Moskva: JSC “GSPI”, 2022. (in Russian).

## Кинетические характеристики процесса регенерационной утилизации отработанного раствора химического никелирования

© 2023. М. А. Шумилова, к. х. н., в. н. с., Н. Е. Суксин, м. н. с.,  
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,  
426067, Россия, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, д. 34,  
e-mail: shumilovama@udman.ru

По степени отрицательного воздействия на окружающую среду гальванические производства занимают лидирующие позиции в промышленном производстве, поэтому внедрению технологии регенерационной утилизации уделяется всё большее внимание. Проведено исследование кинетики реакции утилизации отработанного раствора химического никелирования раствором гидроксида натрия. Определены кинетические характеристики изучаемого процесса. Установлено, что реакция осаждения относится к реакциям второго порядка. Рассчитаны наблюдаемые константы скорости, которые характеризуются высокими значениями коэффициентов аппроксимации. Значения энергии активации процесса и предэкспоненциального множителя в уравнении Аррениуса, определённые как графическим, так и расчётным способами, имеют близкие значения. Найденная величина энергии активации указывает на слабую зависимость константы скорости реакции от температуры. Показано, что реакция осаждения сульфата никеля гидроксидом натрия не требует больших энергетических затрат и может быть использована для регенерационной утилизации электролита.

**Ключевые слова:** отработанный раствор химического никелирования, гидроксид натрия, порядок реакции, константа скорости реакции, энергия активации.

## Kinetic characteristics of the regenerative utilization process of the spent solution after chemical nickel plating

© 2023. М. А. Shumilova ORCID: 0000-0001-5582-0258  
N. E. Suksin ORCID: 0000-0003-1516-545X  
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

Galvanic production in terms of the degree of negative impact on the environment occupies a leading position in the global industrial production; therefore, the introduction of regenerative recycling technology is receiving increasing attention. The aim of the present work is to determine the kinetic characteristics of the precipitation reaction in a solution of nickel sulfate with sodium hydroxide to develop a technology for the regeneration utilization of spent solutions of chemical nickel plating (SCNPS).

The object of the study was the spent solution of chemical nickel plating of one of the industrial enterprises of Izhevsk. The experiment was carried out in the temperature range 293–333 K at various concentrations of sodium hydroxide (1.25–2.60 M) and nickel sulfate (0.037–0.06 M).

To determine the order of the reaction, we plot graphs in the coordinates  $\lg w - \lg C(\text{Ni})$  using the experimental data, where  $w$  is the reaction rate. The tangent of the slope of the obtained linear dependences with a high degree of approximation ( $R^2 = 0.98$ ) is close to 2, therefore, the order of the reaction of the deposition of SCNPS with sodium hydroxide is second.

With a graphical method for determining the rate constant of a second-order reaction for the dependence  $1/C = f(t)$ , the tangent of the slope of the straight line corresponds to the calculated parameter. In the investigated temperature range the rate constant takes values from  $5 \cdot 10^{-4}$  to  $9 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

The activation energy of the precipitation reaction, determined by the Arrhenius equation by graphic and calculation methods, is  $16.57 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  and  $16.44 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , respectively. The low values of  $E_a$  indicate a weak dependence of the reaction rate on temperature. Consequently, the introduction of the technology for the regeneration utilization of SCNPS will not entail large expenditures of energy resources for heating the reaction masses.

**Keywords:** spent chemical nickel plating solution, sodium hydroxide, reaction order, reaction rate constant, activation energy.

Многочисленными исследованиями установлено, что широко используемые гальванические производства занимают одно из первых мест по степени отрицательного воздействия на окружающую среду [1–4], одновременно с этим происходит истощение запасов природных ресурсов. Наиболее оптимальным решением данной проблемы является внедрение технологии регенерационной утилизации отработанных гальванических растворов [5–7] и, в частности, растворов химического никелирования [8–12], что позволяет получить рабочие растворы никелирования с минимизацией экологического ущерба и экономических затрат. На стадии химических превращений для определения оптимальных условий проведения и аппаратурного оформления процесса необходимо исследовать совокупность кинетических характеристик реакции [13–16], лежащей в основе предлагаемой технологии. Так, для снижения содержания солей никеля в сточных водах гальванического производства на предприятии Suzuki Indomobil Motor Plant (SIMP) [13] проводилось сравнение эффективности работы с использованием усовершенствованного окислительного процесса (УОП) и электрокоагуляции (ЭК). Было установлено, что оптимальными условиями УОП реактора являются: рН 10, скорость потока озона 2 л/мин, время контакта 60 мин, при этом извлекается 99,75% никеля; для ЭК-реактора оптимальные условия, при которых удаляется 99,75% никеля, таковы: рН 6,5, плотность тока 20 мА/см<sup>2</sup>, время контакта 50 мин. Проведённые исследования по кинетике удаления ионов никеля показали, что реакция относится к реакциям второго порядка со значением константы скорости реакции 0,1783 л/мг/мин ( $R^2 = 0,9687$ ). Авторами показано [14], что в технологическом процессе гетерогенной химической реакции выщелачивания оксида никеля существенное влияние оказывают размеры частиц, температура и время протекания реакции, концентрация раствора кислоты и соотношение твёрдое вещество / жидкость. Вычисленная величина энергии активации 41,1 кДж/моль свидетельствует о том, что реакция является поверхностным химически контролируемым процессом. На основе проведённых экспериментальных исследований [15] по разрушению аммиачных комплексов никеля в отработанных гальванических растворах было установлено, что оптимальным реагентом-осадителем является 30%-ный раствор NaOH и температура 323 К; процесс

протекает в диффузной области и имеет первый порядок реакции. Проведено определение кинетических характеристик процесса осаждения никеля из раствора карбамидом, которое позволило установить влияние отдельных параметров на скорость реакции и оптимизировать процесс осаждения, а также получить математическую модель кинетики процесса, используемую для расчётов промышленных реакторов [16]. Полученные кинетические характеристики показали, что в процессе осаждения имеется индукционный период, продолжительность которого связана с исходной концентрацией раствора соединений металла и температурой процесса; также на процесс осаждения влияет величина рН раствора, обуславливающая химический состав образующихся осадков. Установлено, что реакция относится к реакциям первого порядка, а величина энергии активации  $E_{\text{акт}} = 104,13$  кДж/моль указывает на протекание процесса в кинетической области.

Целью представленной работы является определение кинетических характеристик реакции осаждения сульфата никеля гидроксидом натрия для разработки технологии регенерационной утилизации отработанных растворов химического никелирования (ОРХН).

### Материалы и методика исследования

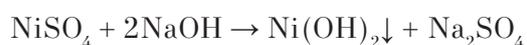
Объектом исследования являлся отработанный раствор химического никелирования одного из промышленных предприятий г. Ижевска, содержащий в своём составе сернокислый никель в пересчёте на чистый металл в количестве 3,58 г/дм<sup>3</sup>, а также гипофосфит натрия, уксусную кислоту и ацетат натрия и, в следовых количествах, тиомочевину.

Кинетику взаимодействия ОРХН с раствором гидроксида натрия квалификации «ч.д.а.» изучали в термостатируемом реакторе Thermostat U-10 со встроенной мешалкой в течение выбранного времени. Эксперимент проводили в температурном диапазоне 293–333 К при различных концентрациях гидроксида натрия (1,25–2,60 М) и сульфата никеля (0,037–0,06 М). Для практически полного осаждения ионов металла соотношение реагентов в растворе, определённое экспериментальным методом, составляло  $\text{NiSO}_4 : \text{NaOH} = 1 : 21$  в молях [17]. Через фиксированные промежутки времени проводили отбор проб раствора, его фильтрование и определение содержания никеля в фильтрате титриметрическим методом с использованием трилона Б в присутствии мурексида (ОСТ 107.460092.001-86). Концентрацию

щёлочи также определяли титриметрически с помощью серной кислоты в присутствии метилового оранжевого [18]. Относительная средняя квадратичная ошибка результатов анализа титриметрическим методом составляла 0,3–0,5%.

### Результаты и обсуждение

Реакцию осаждения солей никеля в ОРХН раствором гидроксида натрия можно записать в следующем виде:



Первым этапом при изучении кинетики химической реакции является определение порядка реакции и константы скорости. Во всех методах определения порядка полагается, что для реакции выполняется основной посту-

лат химической кинетики, представленный в математической форме [19]:

$$w = kC^n \quad (1)$$

где  $w$  – скорость реакции,  $C$  – концентрация исходного вещества,  $n$  – порядок реакции по данному веществу или общий порядок реакции,  $k$  – истинная или эффективная константа скорости реакции.

Экспериментальные данные по содержанию ионов никеля в фильтрате в зависимости от времени и температуры представлены в таблице 1.

Для определения порядка исследуемой нами реакции воспользуемся дифференциальным методом, который заключается в изучении зависимости скорости химической реакции от концентрации исходного вещества. Определение скорости реакции в фиксируе-

Таблица 1 / Table 1

Зависимость содержания сульфата никеля в фильтрате от времени и температуры реакции  
Dependence of nickel sulfate content in the filtrate on reaction time and temperature

$t, c / t, s$	$C(\text{NiSO}_4), \text{mM} / C(\text{NiSO}_4), \text{mM}$			
	293 K	303 K	313 K	333 K
0	61,04	61,04	61,04	61,04
300	1,26	1,19	1,04	0,345
600	1,05	0,9926	0,94	0,298
900	0,84	0,8666	0,69	0,256
1800	0,63	0,5956	0,52	0,208
3600	0,42	0,3970	0,35	0,168

Таблица 2 / Table 2

Зависимость скорости реакции от времени и начальной концентрации гидроксида натрия (T = 303 K)  
The dependence of the reaction rate on time and the initial concentration of sodium hydroxide (T = 303 K)

$C(\text{NaOH}), \%$	$t, c / t, s$	$C(\text{NiSO}_4), \text{mM} / C(\text{NiSO}_4), \text{mM}$	$w, \text{mM}\cdot\text{c}^{-1} / w, \text{mM}\cdot\text{s}^{-1}$	$n$	$R^2$
10	300	1,19		1,899	0,982
	600	0,9926	0,00066		
	900	0,8666	0,00042		
	1800	0,5956	0,00022		
	3600	0,3970	0,00011		
15	300	0,5956		1,972	0,934
	600	0,4963	0,00033		
	900	0,397	0,00033		
	1800	0,2978	0,00014		
	3600	0,2185	0,00007		
20	300	0,5956		1,993	0,980
	600	0,4856	0,00030		
	900	0,4169	0,00022		
	1800	0,2978	0,00013		
	3600	0,2295	0,00006		

Примечание:  $C$  – концентрация вещества,  $t$  – время,  $w$  – скорость реакции,  $n$  – порядок реакции,  $R^2$  – коэффициент детерминации.

Note:  $C$  – substance concentration,  $t$  – time,  $w$  – speed reaction,  $n$  – reaction order,  $R^2$  – coefficient of determination.

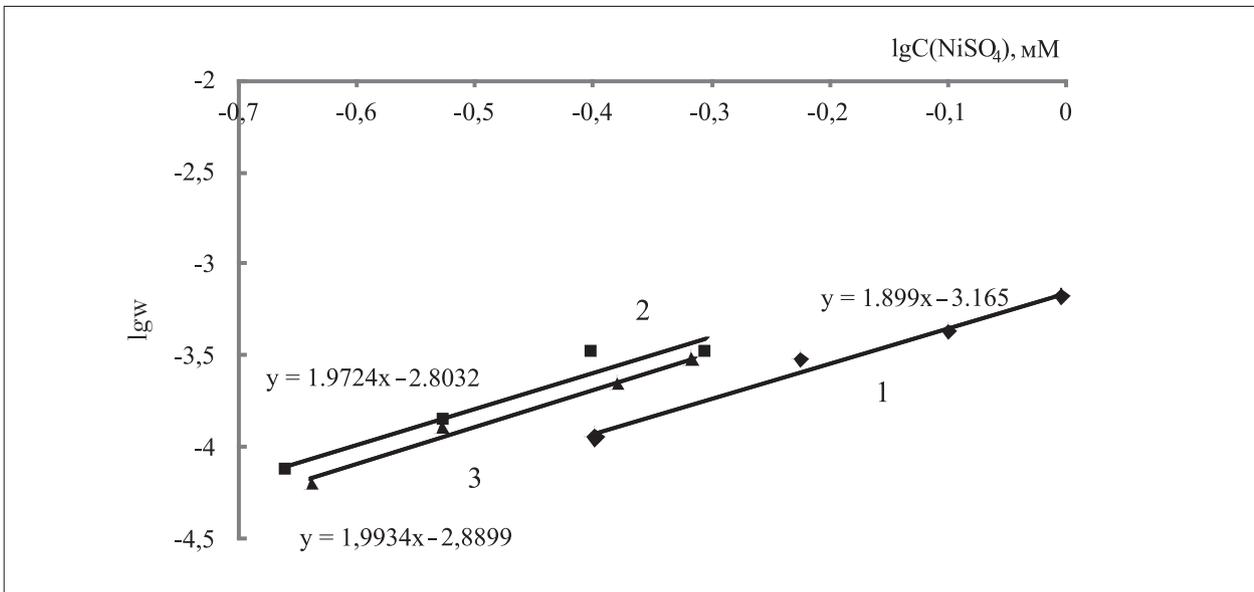


Рис. 1. Зависимость скорости реакции от концентрации сульфата никеля: 1 – 10% NaOH, 2 – 15% NaOH, 3 – 20% NaOH

Fig. 1. Dependence of the reaction rate on the concentration of nickel sulfate: 1 – 10% NaOH, 2 – 15% NaOH, 3 – 20% NaOH

мые моменты времени сводится к дифференцированию концентрации сульфата никеля от времени:

$$w = -\frac{d[NiSO_4]}{dt} \quad (2)$$

с использованием формулы численного дифференцирования [19] для функции  $y(x)$  методом конечных разностей:

$$y'(x_0) = \frac{y(x_0 + h) - y(x_0)}{h} \quad (3)$$

Результаты аналитического определения концентрации соли никеля и скорости реакции по данному реагенту представлены в таблице 2.

Таким образом, нами получены значения скорости реакции и соответствующие им текущие величины концентрации никеля в растворе, то есть исходные данные для определения порядка реакции дифференциальным методом. При линеаризации уравнения (1) эта зависимость имеет вид [20]:

$$\lg w = \lg k + n \cdot \lg C \quad (4)$$

и график представляет прямую линию, тангенс угла которой равен порядку реакции. Построив графики в координатах  $\lg w - \lg C(Ni)$ , представленные на рисунке 1, определяем, что тангенс угла наклона полученных линейных зависимостей с высокой степенью аппроксимации (табл. 2) близок к 2, следова-

тельно, порядок реакции осаждения ОРХН гидроксидом натрия второй.

Кинетическое уравнение реакции второго порядка имеет следующий вид:

$$kC^2 = -\frac{dC}{dt} \quad (5)$$

данное уравнение после интегрирования в пределах от  $C_0$  до  $C$  принимает линейную форму:

$$\frac{1}{C} = kt + \frac{1}{C_0} \quad (6)$$

и при графическом методе определения константы скорости тангенс угла наклона прямой соответствует вычисляемому параметру. Линейные зависимости, полученные при подстановке экспериментальных данных, представлены на рисунке 2(а–г), и позволили определить константу скорости реакции осаждения ОРХН щёлочью в исследуемом диапазоне температур. Как видно из таблицы 3, вычисленные кинетические параметры характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации ( $R^2$ ).

Наиболее точно зависимость константы скорости реакции от температуры описывает уравнение Аррениуса:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

где  $E_a$  – аррениусовская или опытная энергия активации, кДж·моль<sup>-1</sup>;  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31441$  Дж·моль<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель, дм<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>, практически не зависящий от температуры и пропорциональный числу столкновений молекул с подходящей пространственной ориентацией; физический смысл данной константы заключается в её равенстве константе скорости реакции при температуре, стремящейся к бесконечности.

Уравнение Аррениуса в логарифмической форме [20]:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (8)$$

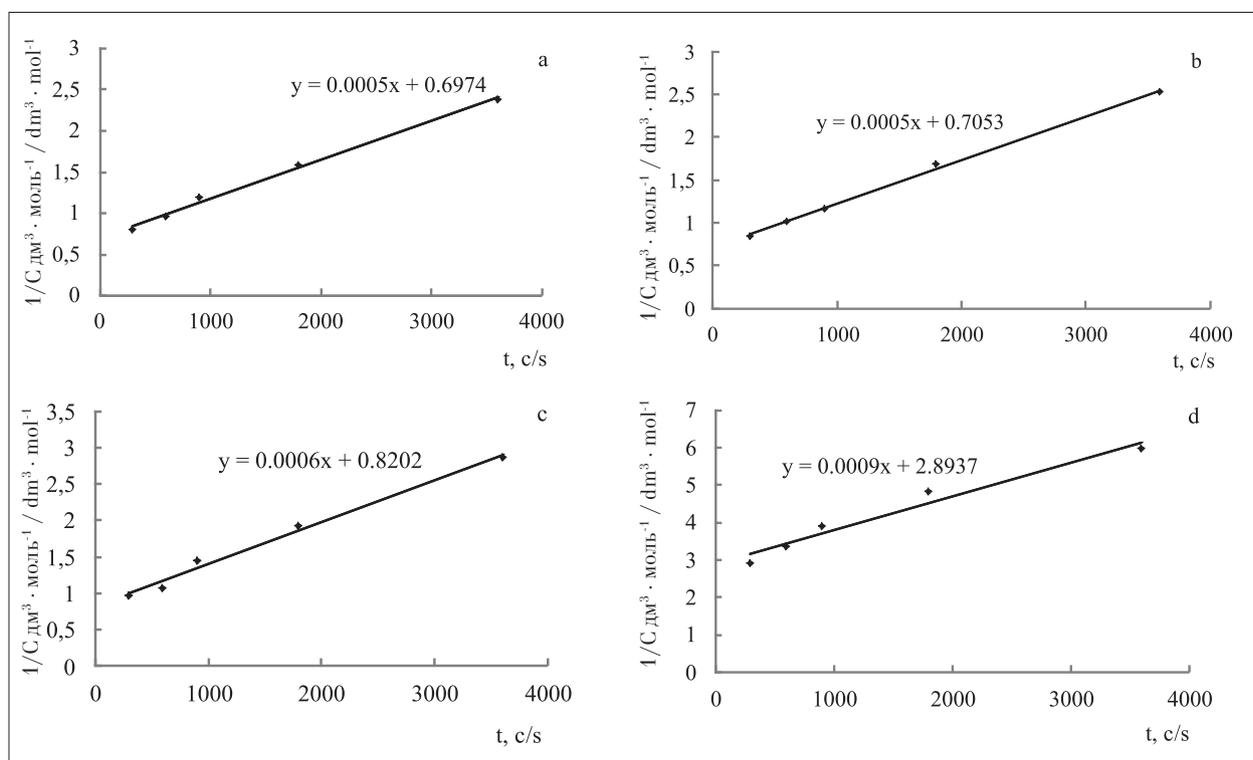
используется для графического определения энергии активации (рис. 3). Тангенс

угла наклона прямой соответствует  $(-E_a/R)$ , а отрезок, отсекаемый на оси ординат, равен  $\ln k_0$ . Построение линии линейной регрессии по экспериментальным точкам и вычисление её уравнения, осуществлённого с помощью программного пакета Microsoft Office Excel (рис. 3), установило, что  $\text{tg}\alpha = -1994$ . Следовательно,

$$-\frac{E_a}{R} = -1994 \text{ и энергия активации реакции}$$

осаждения в растворе сульфата никеля гидроксидом натрия составляет  $E_a = 16578$  Дж·моль<sup>-1</sup> = 16,58 кДж·моль<sup>-1</sup>, а величина предэкспоненциального множителя равна  $\ln k_0 = -1,0312$  и  $k_0 = -0,356$  дм<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>.

Зная константы скорости реакции при двух температурах  $T_1$  и  $T_2$ , возможно определение энергии активации процесса расчётным методом, используя формулу [20]:

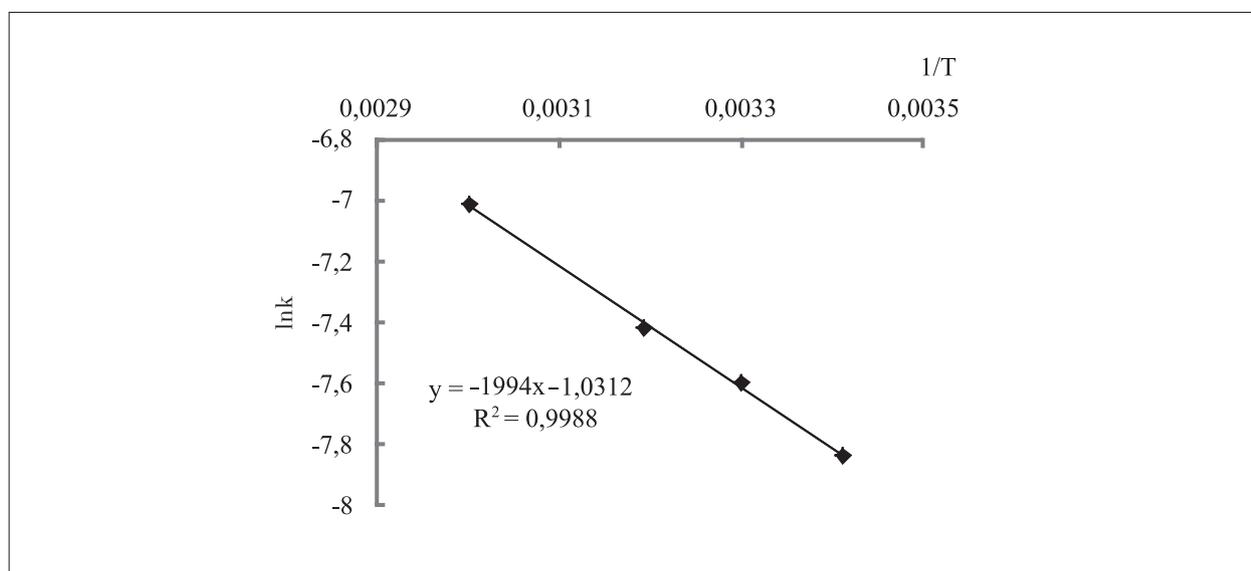


**Рис. 2.** Зависимость обратной концентрации сульфата никеля от времени при различных температурах: а – 293К, б – 303К, с – 313К, d – 333К  
**Fig. 2.** Dependence of the inverse concentration of nickel sulfate on time at different temperatures: а – 293К, б – 303К, с – 313К, d – 333К

**Таблица 3 / Table 3**

Значения наблюдаемых констант скорости и коэффициентов детерминации для различных температур / Values of the observed velocity constants and approximation coefficients for different temperatures

$T, K$	$k, \text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{c}^{-1} / k, \text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$R^2$
293	$5 \cdot 10^{-4}$	0,994
303	$5 \cdot 10^{-4}$	0,998
313	$6 \cdot 10^{-4}$	0,988
333	$9 \cdot 10^{-4}$	0,960



**Рис. 3.** Зависимость натурального логарифма скорости реакции от обратной температуры  
**Fig. 3.** Dependence of the natural logarithm of the reaction rate on the inverse temperature

$$E_a = \frac{RT_1T_2 \ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right)}{T_2 - T_1} \quad (9)$$

При подстановке полученных значений константы скорости реакции при соответствующей температуре и проведя вычисления по формуле (9), получаем  $E_a = 16,44$  кДж·моль<sup>-1</sup> и  $k_0 = 0,346$  дм<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup>. Как видно из полученных констант, кинетические параметры, вычисленные двумя способами, близки по величине, хотя считается, что вычисление по крайним экспериментальным точкам даёт менее точные значения [19].

В результате дифференцирования уравнения Аррениуса (8) по температуре оно принимает следующий вид:

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E_a}{RT^2} \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что чем больше величина  $E_a$ , тем быстрее происходит увеличение константы скорости с возрастанием температуры. Определённые нами двумя способами невысокие значения  $E_a$  свидетельствуют о слабой зависимости скорости реакции от температуры, что находит подтверждение в полученных экспериментальных данных. Реакция осаждения ионов никеля щёлочью протекает практически полностью в течение первых 5 мин даже при комнатной температуре, в дальнейшем временном диапазоне уменьшение концентрации металла в надосадочном растворе происходит незначитель-

но. Следовательно, внедрение технологии регенерационной утилизации ОРХН не повлечёт за собой больших затрат энергоресурсов для нагревания реакционных масс, реакция протекает в полном объёме при комнатной либо нагретой до 30–40 °С температуре реакционной смеси.

### Заключение

В рамках разработки технологии регенерационной утилизации отработанных растворов химического никелирования проведено определение кинетических характеристик реакции осаждения сульфата никеля гидроксидом натрия. Установлено, что порядок исследуемой реакции второй; вычисленные значения наблюдаемых констант скорости реакции лежат в диапазоне от  $5 \cdot 10^{-4}$  до  $9 \cdot 10^{-4}$  дм<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>·с<sup>-1</sup> в зависимости от температуры и характеризуются высокими значениями коэффициентов аппроксимации. Определённые графическим и расчётным методами энергия активации и предэкспоненциальный множитель имеют близкие значения и свидетельствуют о слабой зависимости скорости реакции от температуры, что позволяет проводить реакцию утилизации ОРХН при комнатной или нагретой до 30–40 °С температуре реакционной смеси.

### Литература

1. Зингер Е.Ю., Нор П.Е. Воздействие гальвано-производства на окружающую среду // Экологические проблемы региона и пути их разрешения: материалы

XV Международной научно-практической конференции. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2021. С. 96–98.

2. Петров В.Г., Суксин Н.Е. Утилизация твёрдых отходов гальванического производства по нанесению цинковых покрытий // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 106–110.

3. Селиванова Н.В., Трифонова Т.А., Ширкин Л.А. Утилизация отходов гальванического производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1 (8). С. 2085–2088.

4. Nickel plating handbook. Toronto: Publ. house Nickel institute, 2022. 103 p.

5. Петров В.Г., Семакин В.П., Трубочёв А.В. Использование кислотных реагентов при утилизации осадков сточных вод. Ижевск: Изд-во ИПМ УрО РАН, 2005. 186 с.

6. Мажуга А.Г., Колесников В.А., Сахаров Д.А., Корольков М.В. Техногенные отходы I–II классов опасности – ресурс для получения вторичных продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 61–67.

7. Платонова А.С., Нафикова Э.В. Утилизация гальванических отходов и применение их при производстве строительных материалов // Экологическая безопасность в техносферном пространстве: материалы III Международной научно-практической конференции преподавателей, молодых учёных и студентов. Екатеринбург: Изд-во РГППУ, 2020. С. 113–117.

8. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Регенерационная утилизация отработанных растворов химического никелирования // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25. № 2. С. 262–270.

9. Tsai T.-H., Chou H.-W., Wu Y.-F. Removal of nickel from chemical plating waste solution through precipitation and production of micro-sized nickel hydroxide particles // Separation and Purification Technology. 2020. V. 251. Article No. 117315.

10. Shaikh A., Singh B.K., Purnendu K., Kumari P., Sankar P.R., Mundra G., Bohm S. Utilization of the nickel hydroxide derived from a spent electroless nickel plating bath for energy storage application // RSC Sustainability. 2023. No. 1. P. 294–302.

11. Laokhen P., Ma-Ud N., Yingnakorn T., Patcarawit T., Khumkoa S. Recovery of nickel from spent electroplating solution by hydrometallurgical and electrometallurgical process // Journal of Metals, Materials and Minerals. 2022. V. 32. No. 2. P. 95–100.

12. Laokhen P., Khumkoa S., Buahobura P., Piyawit W., Patcharawit T., Kareram A., Srikhang L. Preliminary study on recovery of nickel from electro-nickel-plating solution by electrowinning // Journal of Materials Sciences & Engineering. 2019. V. 8. No. 5. Article No. 541.

13. Moersidik S.S., Nugroho R., Handayani M., Kamilawati, Pratama M.A. Optimization and reaction kinetics on the removal of nickel and COD from wastewater from electroplating industry using electrocoagulation and advanced

oxidation processes // Heliyon. 2020. V. 6. P. e03319.

14. Abdel-Aal E.A., Rashad M.M. Kinetic study on the leaching of spent nickel oxide catalyst with sulfuric acid // Hydrometallurgy. 2004. V. 74. P. 189–194.

15. Юрченко Г.О. Кинетика процессу осаждения катионів нікелю (II) // Технологический аудит и резервы производства. 2012. № 3/2 (5). С. 35–36.

16. Корчуганова О.М., Танцюра Е.В. Дослідження кінетики осаження нікелю з розчину // Наукові вісті національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». 2015. № 3 (101). С. 112–117.

17. Шумилова М.А., Суксин Н.Е. Отработанный раствор химического никелирования – ресурс для получения новых продуктов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 131–136.

18. Крешков А.П. Основы аналитической химии. Теоретические основы. Количественный анализ. М.: Химия, 1971. Кн. 2. 456 с.

19. Леванов А.В., Антипенко Э.Е. Введение в химическую кинетику. М.: МГУ, 2006. 51 с.

20. Гуров А.А., Бадаев Ф.З., Овчаренко Л.П., Шаповал В.Н. Химия: учебник. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 748 с.

## References

1. Singer E.Yu., Nor P.E. The impact of electroplating on the environment // Environmental problems of the region and ways to resolve them: Materialy XV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Omsk: OmGTU, 2021. P. 96–98 (in Russian).

2. Petrov V.G., Suksin N.E. Disposal of solid waste from electroplating production for applying zinc coatings // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 106–110 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-106-110

3. Selivanova N.V., Trifonova T.A., Shirkin L.A. Disposal of galvanic production waste // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2011. V. 13. No. 1 (8). P. 2085–2088 (in Russian).

4. Nickel plating handbook. Toronto: Nickel institute, 2022. 103 p.

5. Petrov V.G., Semakin V.P., Trubachev A.V. The use of acid reagents in the disposal of sewage sludge. Izhevsk: IPM UrO RAN, 2005. 186 p. (in Russian).

6. Mazhuga A.G., Kolesnikov V.A., Sakharov D.A., Korolkov M.V. Technogenic waste of hazard classes I–II – a resource for obtaining secondary products // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 61–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-061-067

7. Platonova A.S., Nafikova E.V. Utilization of galvanic waste and their use in the production of building materials // Environmental safety in the technosphere: Materialy III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii prepodavatelej, molodyh uchyonyh i studentov. Ekaterinburg: RGPPU, 2020. P. 113–117 (in Russian).

8. Shumilova M.A., Suksin N.E. Regenerative disposal waste solutions of chemical nickel plating // *Himicheskaya fizika i mezoskopiya*. 2023. V. 25. No. 2. P. 262–270 (in Russian). doi: 10.15350/17270529.2023.2.24
9. Tsai T.-H., Chou H.-W., Wu Y.-F. Removal of nickel from chemical plating waste solution through precipitation and production of microsized nickel hydroxide particles // *Separation and Purification Technology*. 2020. V. 251. Article No. 117315. doi: 10.1016/j.seppur.2020.117315
10. Shaikh A., Singh B.K., Purnendu K., Kumari P., Sankar P.R., Mundra G., Bohm S. Utilization of the nickel hydroxide derived from a spent electroless nickel plating bath for energy storage application // *RSC Sustainability*. 2023. No. 1. P. 294–302. doi: 10.1039/d2su00036a
11. Laokhen P., Ma-Ud N., Yingnakorn T., Patcarawit T., Khumkoa S. Recovery of nickel from spent electroplating solution by hydrometallurgical and electrometallurgical process // *Journal of Metals, Materials and Minerals*. 2022. V. 32. No. 2. P. 95–100. doi: 10.55713/jmmm.v32i2.1253
12. Laokhen P., Khumkoa S., Buahobura P., Piyawit W., Patcharawit T., Kareram A., Srikhang L. Preliminary study on recovery of nickel from electro-nickel-plating solution by electrowinning // *Journal of Materials Sciences & Engineering*. 2019. V. 8. No. 5. Article No. 541.
13. Moersidik S.S., Nugroho R., Handayani M., Kamilawati, Pratama M.A. Optimization and reaction kinetics on the removal of nickel and COD from wastewater from electroplating industry using electrocoagulation and advanced oxidation processes // *Heliyon*. 2020. V. 6. P. e03319. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03319
14. Abdel-Aal E.A., Rashad M.M. Kinetic study on the leaching of spent nickel oxide catalyst with sulfuric acid // *Hydrometallurgy*. 2004. V. 74. P. 189–194.
15. Yurchenko G.O. Kinetics of nickel(II) cation deposition process // *Ekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. 2012. No. 3/2 (5). P. 35–36 (in Ukrainian).
16. Korchuganova O.M., Tancyura E.V. Investigation of the kinetics of nickel deposition from solution // *Naukovi visti natsionalnoho tekhnichnoho universytetu “Kyivskiy politekhnichnyi instytut”*. 2015. No. 3 (101). P. 112–117 (in Ukrainian).
17. Shumilova M.A., Suksin N.E. The spent solution of chemical nickel plating is a resource for obtaining new products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 131–136 (in Russian). doi: 10.25750/10.25750/1995-4301-2022-4-131-136
18. Kreshkov A.P. Fundamentals of analytical chemistry. Theoretical foundations. Quantitative analysis. Moskva: Himiya, 1971. Book 2. 456 p. (in Russian).
19. Levanov A.V., Antipenko E.E. Introduction to chemical kinetics. Moskva: MGU, 2006. 51 p. (in Russian).
20. Gurov A.A., Badaev F.Z., Ovcharenko L.P., Shapoval V.N. Chemistry: textbook. Moskva: MGTU im. N.E. Baubana, 2004. 748 p. (in Russian).

## Моделирование как прогноз трансформации почв при техногенном засолении

© 2023. П. Ш. Сайранова, м. н. с., Е. А. Хайрулина, д. г. н., в. н. с.,  
Н. В. Митракова, к. б. н., с. н. с., Н. В. Порошина, к. х. н., с. н. с.,  
Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Генкеля, д. 4,  
e-mail: sairanova.p@gmail.com

Проблема засоления почв является актуальной не только для сельскохозяйственных территорий, но и при добыче полезных ископаемых, в местах поступления рассолов на поверхность в виде пластовых вод или стоков со шламохранилищ и солеотвалов горнодобывающих предприятий. В настоящее время мало проработана оценка и отсутствует нормативное обеспечение (ПДК, ОДК) оценки техногенного засоления почв. Целью статьи является разработка математической модели для прогноза трансформации почв, подверженных техногенному засолению. Объектами исследования были почвы трёх типов ландшафтов: элювиальных, транзитных и аллювиальных, находящихся в зоне техногенного засоления. Для разработки модели использовали информационно-логический анализ и почвенные показатели, которые определяли стандартными методами. Информационно-логический анализ показал, что наибольшее влияние на засоление оказывает коэффициент адсорбции натрия, далее по убыванию: содержание ионов кальция, сульфат-ионов в водной вытяжке почвы, расчётный показатель –  $\Delta pH$  и pH солевой вытяжки. Модель показала, что наибольшая сумма токсичных солей проявляется при  $pH_{KCl}$  5,3–7,4, при содержании сульфат-ионов больше 500 мг/кг, при содержании  $Ca^{2+}$  больше 1000 мг/кг и при SAR больше 10, а при  $\Delta pH$  меньше 0,5. Данные значения показателей соответствуют аллювиальным почвам долин малых рек, они наиболее подвержены трансформации почв. С помощью полученной информационно-логической модели и почвенных показателей возможно составление прогноза трансформации почв при техногенном засолении.

**Ключевые слова:** информационно-логический анализ, техногенное засоление, моделирование, прогноз засоления почв.

## Modeling as a tool for soil transformation forecasting under technogenic salinization

© 2023. P. Sh. Sairanova ORCID: 0000-0003-4121-0859, E. A. Khayrulina ORCID: 0000-0002-9074-8551,  
N. V. Mitrakova ORCID: 0000-0002-3172-4146, N. V. Poroshina ORCID: 0000-0002-1761-6720  
Perm State National Research University,  
4, Genkelya St., Perm, Russia, 614990,  
e-mail: sairanova.p@gmail.com

The problem of soil salinization is relevant not only for agricultural areas but also for mining, where brines enter the surface as formation water or runoff from sludge storage facilities and salt dumps of mining enterprises. Currently, there is little elaboration of assessment and lack of normative support (MPC, APC) for assessment of technogenic salinisation of soils. The aim of this research is to develop a mathematical model for predicting the transformation of soils affected by technogenic salinization. The research focuses on soils in three types of landscapes, namely eluvial, transitional, and alluvial, located in the area of technogenic salinization. To develop the model, information-logical analysis and soil indicators were employed. These indicators were determined by standard methods. According to the information-logical analysis the sodium adsorption coefficient is the dominant factor of soils' salinity; descending further: calcium ion content, sulfates content in the soil water extract and the calculated indicators ( $\Delta pH$  and pH) of the salt extract. The model showed that the highest amount of toxic salts is observed when  $pH_{KCl}$  ranges from 5.3 to 7.4, sulfate content is above 500 mg/kg, calcium content is above 1000 mg/kg, SAR is above 10, and  $\Delta pH$  is below 0.5. These indicator values correspond to alluvial soils found in small river valleys; these soils are highly prone to transformation. Using the obtained information-logical model and soil indicators, it is possible to make a forecast of soil transformation under technogenic salinization.

**Keywords:** information-logical analysis, technogenic salinization, modeling, soil salinization forecast.

Поступление на поверхность почвы или близкое залегание грунтовых вод хлоридно-натриевого состава в гумидной зоне с промывным водным режимом приводит к засолению почвы. Источником хлоридно-натриевого засоления грунтовых вод являются естественные выходы NaCl подземных вод [1], буровые растворы [2], изливающиеся разведочные скважины [3] и фильтрационные воды с отходов калийного производства [4, 5]. Подземные воды, перераспределяя накопленные соли в почвенном профиле, обуславливают возникновение солончаковых почв или вторичных солончаков. Засоление почв сопровождается изменением их химических и морфологических свойств, что приводит к смене растительности, снижению биоразнообразия [3, 5, 6]. В северной части Пермского края техногенное засоление почв связано с разработкой полезных ископаемых.

В настоящее время мало проработана оценка техногенного засоления почв. Чаще всего процесс засоления почв рассматривают совместно с исследованием состояния растительного покрова. Установлено, что в районе воздействия содовой промышленности засоление почв связано с уровнем засоленных подземных вод и некоторые виды галофитов могут быть индикаторами уровня почвенного засоления [7].

Отсутствует нормативное обеспечение оценки засоления почв. В настоящее время в России нормативами, в отличие от поверхностных вод, не установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) или ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) солей в почвах [8].

Математическое моделирование почвенных процессов является относительно молодым и активно развивающимся направлением в науке. Традиционно в почвоведении используется системный подход, математическое моделирование особенно эффективно в данной сфере [9]. Оно обладает рядом преимуществ, которые и обуславливают популярность и актуальность данного направления. Первое – процесс может быть изучен до его осуществления (например, моделирование нефтеотмывания [10]), что позволяет спрогнозировать отрицательные последствия до их реального появления. Второе – математическое моделирование позволяет изучать почвенные процессы с учётом не только элементов, но и различных связей между ними [11].

Так, модель ROMUL описывает минерализацию и гумификацию опада и органического

вещества почвы, связанную с этими процессами эмиссию углекислого газа и высвобождение азота в доступных для растений минеральных формах [12]. Модель DAISY (Differential Algebra for Identifiability of SYstems) – это механистическая имитационная модель физических и биологических процессов, применяемая в сельском хозяйстве. Модель может прогнозировать производство, воздействие на окружающую среду в виде выщелачивания и изменение качества почвы (углерода) с течением времени [13]. RothC (Rothamsted Long Term Field Experiments Carbon Model) – это модель круговорота органического углерода в не заболоченном верхнем слое почвы, которая учитывает влияние типа почвы, температуры, влажности почвы и растительного покрова на процесс круговорота [14]. Модель BASFOR (BASic FORest model) используется для анализа рисков, связанных с засухой для хвойных лесов в Европе. Модель работает с ежедневным временным шагом и моделирует динамику запасов углерода, азота и воды в органах деревьев и почве [15].

В последнее время всё шире используется универсальный, не требующий линейности и позволяющий делать логические высказывания между любыми свойствами информационно-логический анализ (ИЛА), который можно использовать для прогнозирования состояний [16]. Метод ИЛА, как и корреляционный анализ, изучает зависимость явления. Однако, кроме тесноты связи, он определяет и форму связи [17]. Основой для ИЛА является метод, опирающийся на теорию информации, где обеспечивается количественная оценка зависимости изучаемого явления от набора входящих в анализ факторов. Здесь определяется мера зависимости, как от каждого фактора, так и от совместного их действия. Поэтому есть возможность выделить главные и второстепенные факторы [18, 19].

Метод ИЛА успешно применяется в различных областях знаний. С его помощью может быть установлена степень влияния разных показателей на формирование профиля почв [20], выявлены закономерности в дифференциации почвенного покрова [21], установлены формы связи между урожайностью культуры и типом почвы [22], найдены взаимосвязи производственного потенциала и экономической эффективности сельскохозяйственных организаций [23] и многое другое.

Для территории, находящейся непосредственно в зоне засоления в связи с деятельностью с горнодобывающей промышленности

к числу наиболее актуальных исследований можно отнести исследование взаимосвязи почвенных показателей и степени засоления почв.

Целью работы является разработка информационно-логической модели для прогноза трансформации почв, находящихся в зоне техногенного засоления.

### Объекты и методы исследования

Образцы почв отбирали в полевые периоды 2019–2022 гг. на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) в разных типах ландшафта: аллювиальный (пойма), транзитный, элювиальный (водораздел). Пробы отобраны на природной и антропогенно-изменённой (промплощадки, места складирования отходов калийного производства) территории. Исследованные почвы согласно [24] представлены серогумусовыми, дерново-подзолистыми, подзолами, аллювиальными и техногенно-поверхностными образованиями. В естественных почвах пробы отобраны по двум верхним горизонтам, в техногенных – по слоям.

Для проведения анализа было взято 167 почвенных проб, в которых определили состав водной вытяжки: количество сульфат-ионов определяли турбидиметрическим методом по ГОСТ 26426-85;  $\text{Ca}^{2+}$  – комплексометрическим методом (ГОСТ 26428-85), обменную кислотность  $\text{pH}_{\text{КСл}}$  – потенциометрическим методом по ГОСТ 26483-85, рассчитали коэффициент адсорбции натрия (SAR), сумму токсичных солей ( $\Sigma\text{тс}$ ) и расчётный показатель –  $\Delta\text{рН}$ . Для математической обработки результатов и моделирования засоления почвы методом ИЛА использовали программу, разработанную учёными кафедры почвоведения и агрохимии Алтайского государственного аграрного университета под руководством профессора Л.М. Бурлаковой [25].

Основными параметрами ИЛА являются коэффициент эффективности передачи информации ( $K_{\text{эфф}}$ ) и показатель специфического состояния.  $K_{\text{эфф}}$  оценивает тесноту связи между фактором и явлением. Наиболее достоверны связи с  $K_{\text{эфф}} > 0,1$ . Ведущим фактором, оказывающим наибольшее влияние, на изучаемое явление, признаётся фактор с наибольшим  $K_{\text{эфф}}$ . С его помощью можно установить степень влияния каждого фактора на изучаемое явление и расположить их в строгой последовательности относительно друг друга. Специфическое состояние – это ве-

личина условных вероятностей, где наиболее вероятным состоянием является то, для которого отношение условных вероятностей максимально. Так, в каждом ранге фактора можно определить самое максимальное отношение, и оно является самым вероятным [16, 17].

В ИЛА большое значение имеет логический характер связи между параметрами и их положение относительно друг друга. Любая логическая функция обладает для каждого из факторов специфичным каналом связи и общим количеством информации, передающимся от фактора к явлению. На этом основании можно распознать характер взаимодействия факторов. Выделяют четыре логических функции дизъюнкции, конъюнкции, нелинейного произведения, равнозначности [26].

Кратко алгоритм действий ИЛА можно представить в следующем виде:

- 1) определение явления и количественных или качественных факторов (параметров);
- 2) ранжирование исходных данных, то есть распределение на ранги явление и каждый фактор; градацию составляют в зависимости от общепринятых классификаций или относительно равномерного распределения;
- 3) разнос исходных данных по рангам явления и фактора;
- 4) расчёт в программе ИЛА;
- 5) определение специфических состояний явления по факторам; эти пять этапов повторяются для каждого параметра;
- 6) определение характера логической связи между параметрами и положения их относительно друг друга;
- 7) составление модели и расчёт её работоспособности.

### Результаты и обсуждение

Основным негативным эффектом от деятельности предприятий по добыче калийных солей является засоление почв. Засоление почвы обусловлено жидкими и твёрдыми отходами, образуемыми при добыче и переработке шламов на калийных предприятиях и складированными на дневной поверхности в шламохранилищах, солетовалах и рассолосборниках [27, 28]. Поэтому в качестве критерия «явление» был выбран показатель – сумма токсичных солей ( $\Sigma\text{тс}$ ). Явление ранжировали согласно степени засоления почв: незасоленные <0,15%; слабозасоленные 0,15–0,3%; средnezасоленные 0,3–0,6%; сильнозасоленные 0,6–1,4%; очень сильнозасоленные >1,4% [29, 30].

Засоление территории рассматривали с разными видами почвенных показателей: анализ водной вытяжки почв (содержание кальция и сульфатов в водной вытяжке почвы), кислотности почвы (обменная кислотность – рН солевой вытяжки), расчётными показателями (коэффициент адсорбции натрия – SAR, разность между рН водной и солевой вытяжки – ΔрН) и расположение в пространстве (глубина отбора почвенных образцов и тип ландшафта).

Метод ИЛА пространственного расположения показал, что связь между явлением и факторами слабая ( $K_{эфф.} < 0,08$ ). Эти факторы нельзя включать в модель, но распределение специфических состояний получилось логичным. В точках отбора высокое накопление солей характерно в нижнем горизонте и в аллювиальном типе ландшафта. Верхний почвенный горизонт и транзитный и элювиальный типы ландшафтов предрасположены к меньшему засолению – 0,30–0,60% и <0,15%. Такое распределение точек отбора почвы по катене имеет отклик во всех факторах, которые рассматривали в ИЛА.

Анализ специфических состояний засоления в зависимости от рН солевой вытяжки показал, что с повышением рН<sub>KCl</sub> увеличивается засоление. Кислое значение рН солевой вытяжки обнаружено в лесных почвах водораз-

делов и сумма токсичных солей там минимальная, при рН<sub>KCl</sub> < 4 специфичное состояние суммы токсичных солей < 0,15 (табл. 1). Нейтральное значение рН отмечено в аллювиальных почвах и в местах складирования отходов (возле солеотвалов и шламохранилищ), где происходит нейтрализация почв вследствие действия на них нейтральных солей – NaCl, KCl.

Для наглядности специфичные состояния засоления в зависимости от рН<sub>KCl</sub> можно представить графически (рис. 1).

Аналогичные операции проводятся для остальных выбранных показателей. Для выделения натриевых почв и для обнаружения процесса осолонцевания использован коэффициент адсорбции натрия (SAR), который также может быть применён как альтернатива доле обменного натрия от ёмкости катионного обмена. Коэффициент SAR выражается отношением концентрации ионов натрия к квадратичному корню суммы ионов кальция и магния [31].

Ещё одним выбранным фактором является показатель ΔрН, разница между рН водной и рН солевой вытяжки. Этот показатель по своему характеризует определяемое ионообменными свойствами почвы распределение «легкообменного» иона водорода между её твёрдой фазой и раствором водной вытяжки. Совокупность обеих величин содержит более

Таблица 1 / Table 1

Распределение экспериментальных данных в ИЛА  
Distribution of experiment data in information-logical ana

Фактор Factor	Явление – сумма токсичных солей Phenomenon – the sum of toxic salts					n(b)
	1 ранг 1st rank	2 ранг 2nd rank	3 ранг 3rd rank	4 ранг 4th rank	5 ранг 5th rank	
рН <sub>KCl</sub>	< 0,15	0,15–0,30	0,30–0,60	0,60–1,40	> 1,40	
< 4	2,400*	0	0,927	0,268	0,124	22
4,1–4,5	1,963*	1,263	0,507	0,292	0,407	22
4,6–5,2	0,768	1,853	2,230*	0,428	0,995	15
5,3–6,4	0,665	0	1,286	0,741	1,606*	26
6,5–7,4	0,602	0,971	0,517	1,200	1,458*	43
> 7,5	0,311	1,878	1,205	2,082*	0,967	37
n(a)	58	12	15	26	56	N = 167
H(A) = 2,061, H(B) = 2,503, T = 0,316, K <sub>эфф.</sub> = 0,126						

Примечание: \* – специфичные состояния явления в зависимости от фактора; n(a) – количество случаев появления в ранге явления; n(b) – количество случаев появления в ранге фактора; N – общее число наблюдений; H(A) – неопределённость по состоянию явления, бит; H(B) – неопределённость по состоянию фактора, бит; T – количество информации, поступающей от фактора к явлению, бит; K<sub>эфф.</sub> – коэффициент эффективности передачи информации.

Note: \* – specific states of the phenomenon depending on the factor; n(a) – number of occurrences in the rank of the phenomenon; n(b) – number of occurrences in the rank of the factor; N – total number of observations; H(A) – uncertainty in the state of the phenomenon, bits; H(B) – uncertainty in the state of the factor, bits; T – amount of information coming from a factor to a phenomenon, bits; K<sub>эфф.</sub> – coefficient of efficiency of information transfer.

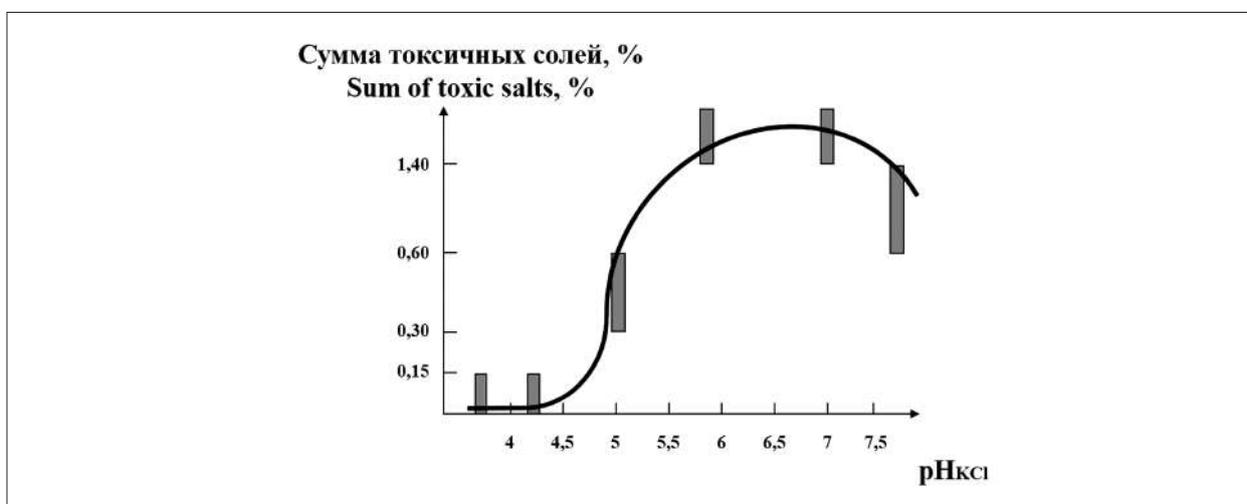


Рис. 1. Специфические состояния засоления территории в зависимости от pH солевой вытяжки почв  
 Fig. 1. Specific states of the area salinization depending on the pH of the soil saline extract

полную информацию о состоянии иона водорода в почве, как двухфазной системе, чем каждая из них в отдельности [32].

Для построения количественной модели засоления так же взяли содержание ионов кальция и сульфат-ионов в водной вытяжке почвы. Содержания ионов в водной вытяжке почв распределили исходя из имеющихся результатов так, чтобы примерно во всех рангах были точки. Другие катионы и анионы имеют сильную связь с суммой токсичных солей: чем больше сумма токсичных солей, тем больше содержание катионов и анионов в водной вытяжке. Это делает распределение неравномерным, что может исказить будущую модель. Их сложно равномерно распределить по рангам явления, а для ИЛА это важно.

В итоге по каждому фактору получено специфичное состояние засоления, то есть можно спрогнозировать, какое будет засоление при определённом содержании в почве того или иного показателя (рис. 2). Так, наибольшая сумма токсичных солей проявляется, когда содержание кальция превышает 1000 мг/кг, содержание сульфатов превышает 500 мг/кг, а коэффициент адсорбции натрия больше 10. У расчётного показателя  $\Delta pH$  обратная зависимость, pH солевой вытяжки в засоленных почвах практически не отличается от pH водной вытяжки, от этого наибольшая сумма токсичных солей проявляется при наименьшем значении  $\Delta pH$ .

При помощи коэффициента передачи информации ( $K_{эфф.}$ ) установили степень влияния каждого фактора на изучаемое явление и расположили их в строгой последовательности относительно друг друга. Самое большое

влияние на засоление имеет коэффициент адсорбции натрия ( $K_{эфф.} = 0,44$ ). Далее идут катионы и анионы водной вытяжки –  $K_{эфф.} Ca^{2+}$  и  $SO_4^{2-}$  (0,25 и 0,22, соответственно). Меньшее влияние оказывают показатели кислотности –  $\Delta pH$  и  $pH_{KCl}$  (0,14 и 0,13, соответственно).

Анализ значений коэффициентов связи позволил установить, какие из факторов наиболее сильно (или наиболее слабо) действуют на данные характеристики и определил характер связи – логическая функция нелинейного произведения. Каналы связи интегрировали в статистическую модель:

$$\sum_{Tc} = SAR \times Ca^{2+} \times SO_4^{2-} \times \Delta pH \times pH_{KCl},$$

где  $\sum_{Tc}$  – засоление почвы, т.е. ранг явления, суммы токсичных солей;  $SAR$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $\Delta pH$ ,  $pH_{KCl}$  – факторы;  $\times$  – знак логической операции функции нелинейного произведения.

Статистическую модель можно преобразовать в таблицу специфичных состояний (табл. 2).

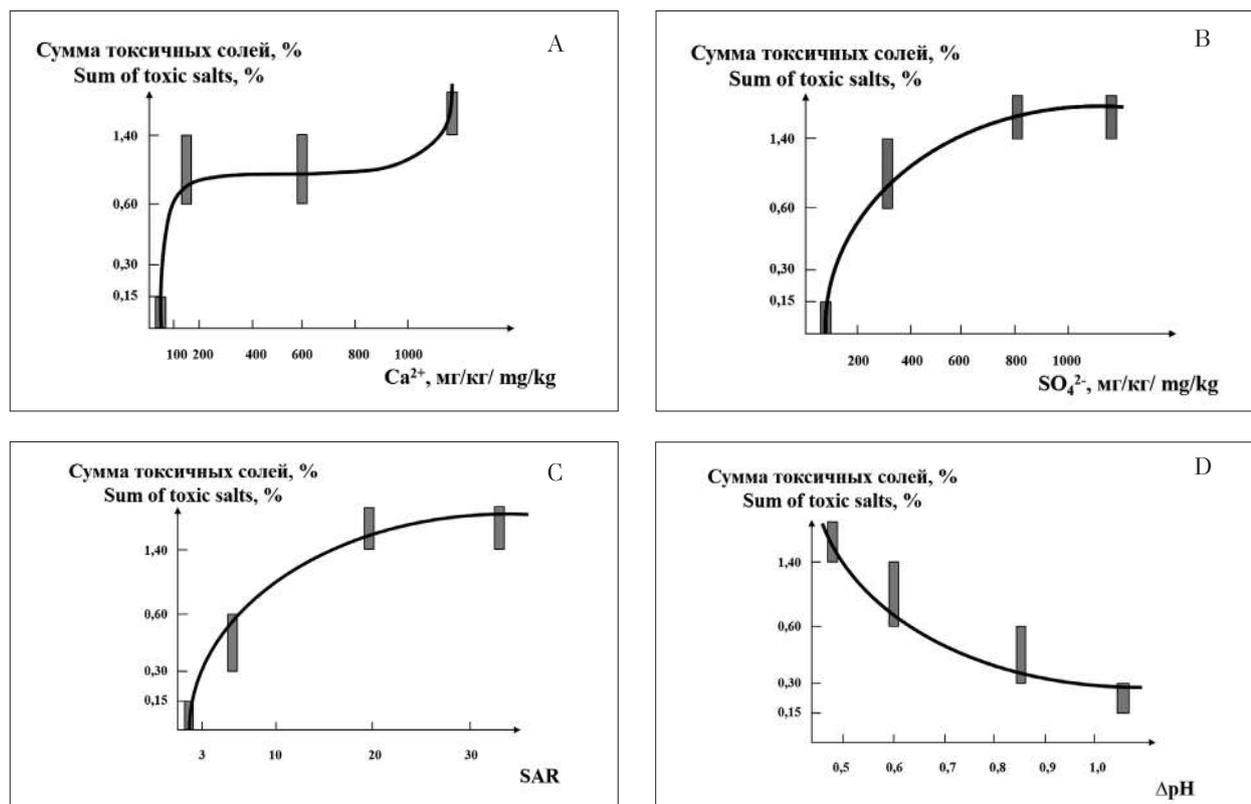
Из таблицы 2 видно, что периферийные значения засоления почвы (незасоленные, сильнозасоленные, очень сильнозасоленные) легче выявить, чем срединные значения от 0,15 до 0,60%. Критические показатели (меньше/больше) сразу выдают аномальность значений, в случае очень сильнозасоленных почв.

Последний этап ИЛА – определить эффективность прогноза построенной модели. С помощью критерия Пирсона установлено, что все зависимости между факторами и функцией модели существенны. Для расчёта прогнозируемой работоспособности модели срав-

нивали процентное соотношение фактического ранга явления с расчётным рангом. Для этого хаотично было выбрано 30 разных явлений (100%), в 18 явлениях расчётный показатель совпал с фактическим – ранг в ранг, в 11 случаях – отличался от фактического на один ранг и только в одном случае расчётный показатель отличался от фактического на 2 ранга. Вывод такой: модель даёт безошибочный прогноз в 60%, с ошибкой в 1 ранг в 97%.

**Заключение**

Информационный анализ экспериментальных данных свидетельствует о различной значимости почвенных показателей в засолении почв. Наибольшее влияние на засоление оказывает коэффициент адсорбции натрия, далее по убыванию содержание кальция и сульфатов в водной вытяжке почвы, ΔрН и рН солевой вытяжки.



**Рис. 2.** Специфические состояния засоления территории в зависимости от А – содержания кальция в водной вытяжке, В – содержания сульфатов в водной вытяжке почвы, С – коэффициента адсорбции натрия, D – ΔрН  
**Fig. 2.** Specific states of the area salinization depending on А – the calcium content in the soil water extract, В – the sulfates content in the soil water extract, С – the sodium adsorption coefficient, D – ΔрН

**Таблица 2 / Table 2**

Специфические состояния засоления территории для каждого фактора  
 Specific states of the area salinization for each factor

Σтс, % Σts, %	Ранг явления Rank of phenomenon	SAR	Ca <sup>2+</sup> , мг/кг mg/kg	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/кг mg/kg	ΔрН	рН <sub>КСl</sub> , ед. рН pH value
< 0,15	1	< 3	< 100	< 200	–*	< 4,5
0,15–0,30	2	–	–	–	>1,0	–
0,30–0,60	3	3–10	–	–	0,7–1,0	4,6–5,2
0,60–1,40	4	–	100–1000	200–500	0,5–0,7	> 7,5
> 1,40	5	> 10	> 1000	> 500	< 0,5	5,3–7,4

Примечание: \* – прочерки обозначают, что для ранга явления отсутствует специфическое состояние по этому фактору, распределение идёт в другие ранги.

Note: \* – dashes indicate that there is no specific state for the rank of the phenomenon to this factor, the distribution goes to other ranks.

Максимальное засоление характерно для почв, расположенных в аллювиальном типе ландшафта. Транзитный и элювиальный типы ландшафтов предрасположены к меньшему засолению – 0,30–0,60% и < 0,15%, соответственно.

Применённый метод информационно-логического анализа для данного объекта исследования показал между явлением и рассмотренными факторами наличие связей и возможностей прогнозирования. В дальнейшем модель можно применять для прогноза степени засоления почвы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FSNF-2020-0021.*

*Авторский коллектив выражает благодарность профессору, доктору сельскохозяйственных наук, Е.Г. Пивоваровой за консультации в работе с информационно-логическим анализом.*

### Литература

1. Хайрулина Е.А., Новосёлова Л.В., Порошина Н.В. Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Географический вестник. 2017. № 1. С. 93–101.
2. Водяницкий Ю.Н., Аветов Н.А., Савичев А.Т., Трофимов С.Я. Характеристика техногеохимических аномалий торфяных почв, загрязнённых шламами в районе нефтедобычи в Среднем Приобье // Агрохимия. 2012. № 11. С. 82–90.
3. Сванидзе И.Г., Моисеенко Т.И., Якимов А.С., Соромотин А.В. Воздействие техногенного галогенеза на водосборные ландшафты речных долин и водные системы (на примере юга Тюменской области) // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 1. С. 94–103.
4. Батурин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М., Наумов Д.Ю., Белкин П.А. Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6 [Электронный ресурс] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513&ysclid=lo44n8xz2c955874412> (Дата обращения: 17.05.2023).
5. Ерёмченко О.З., Митракова Н.В., Шестаков И.Е. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в Соликамско-Березниковском экономическом районе // Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2017. Вып. 3. С. 311–320.
6. Симонова Ю.В., Русаков А.В., Рюмин А.Г. Засолённые почвы Ростовской низины (Ярославская область): морфология, генезис и динамика засоления в годовом гидрологическом цикле // Бюллетень Почвенного ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. Т. 93. С. 40–74.
7. Hulisz P., Piernik A. Soil affected by soda industry in Inowrocław // Technogenic soils of Poland. Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013. P. 125–140.
8. Хайрулина Е.А. Ландшафтообразование в условиях техногенного галогенеза / Е.А. Хайрулина: автореф. дисс. ... докт. геогр. наук. Томск, 2022. 43 с.
9. Михайлов Ф. Моделирование некоторых почвенных процессов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 7 (117). С. 59–64.
10. Куюкина М.С., Ившина И.Б., Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Коростина О.А. Модель нефтеотмывания загрязнённого почвогрунта под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта // Российский журнал биомеханики. 2006. Т. 10. № 1. С. 59–67.
11. Роговая О.Г. Экологическое моделирование. СПб.: ООО «Книжный Дом», 2007. 104 с.
12. Чертов О.Г., Комаров А.С., Надпорожская М.А., Михайлов А.В., Быховец С.С., Зудин С.Л., Зубкова Е.В. Динамическое моделирование процессов трансформации органического вещества почв. Имитационная модель ROMUL / Науч. ред. Б.Ф. Апарин. СПб.: Издательство СПбГУ, 2007. 96 с.
13. Hansen S., Abrahamsen P., Petersen C.T., Styczen M. Daisy: Model use, calibration and validation // Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012. V. 55. No. 4. P. 1315–1333.
14. Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klír J., Körschens M., Poulton P.R., Richter D.D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 // Geoderma. 1997. V. 81. No. 1–2. P. 29–44.
15. van Oijen M., Beer C., Cramer W., Rammig A., Reichstein M., Rolinski S., Seneviratne S., Soussana J.-F. A novel probabilistic risk analysis to determine the vulnerability of ecosystems to extreme climatic events // Environmental Research Letters. 2013. No. 8. Article No. 015032. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015032
16. Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В. Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Медицинская география. Вып. 3. М.: ВИНТИ, 1969. С. 5–74.
17. Пузаченко Ю.Г., Карпачевский Л.О., Взнуздаев Н.А. Возможности применения информационно-логического анализа при изучении почвы на примере её влажности. Закономерности пространственного варьирования свойств почв и информационно-статистические методы их изучения. М.: Наука, 1970. С. 103–121.
18. Панкова Т.И., Масютенко Н.П., Колтышева Е.В. Возможности моделирования плодородия почв на основе информационно-логического анализа // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 8–16.
19. Математическое моделирование в классификации почвенных систем / Ред. Г.Г. Морковкин. Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020. 71 с.

20. Сайранова П.Ш., Самофалова И.А. Кислотно-основные свойства горных почв на северном и среднем Урале // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 94–97.

21. Самофалова И.А. Информационно-логический анализ дифференциации почвенного покрова высотных геосистем на среднем Урале // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 11 (157). С. 105–114.

22. Пивоварова Е.Г., Люцигер А.О., Усенко С.В., Гаркуша А.А. Разработка частной модели управления плодородием чернозёмных почв в условиях климатических изменений Алтайского Приобья // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2012. № 11 (97). С. 34–38.

23. Хэ Н.Ю., Миненко А.В. Информационно-логический анализ в исследовании взаимосвязи производственного потенциала и экономической эффективности сельхозорганизаций // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011. № 5 (79). С. 108–113.

24. Классификация и диагностика почв России / Ред. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

25. Программа информационно-логического анализа, разработанная учёными кафедры почвоведения и агрохимии Алтайского государственного аграрного университета под руководством профессора Л.М. Бурлаковой [Электронный ресурс] <https://www.asau.ru/ru/2015-03-26-04-56-50/aktualnye-nauchno-issledovatel'skie-razrabotki> (Дата обращения: 01.09.2023).

26. Бурлакова Л.М. Комплексы параметров различных уровней почвенного плодородия и пути его управления в системе земледелия в Алтайском крае // Проблемы регионального природопользования и охраны окружающей среды в Алтайском крае в свете решений XXVI съезда КПСС: тезисы докладов научно-практической конференции. Барнаул, 1983. С. 92–96.

27. Karavaeva T., Menshikova E., Belkin P., Zhdakaev V. Features of arsenic distribution in the soils of potash mines // Minerals. 2022. No. 12. Article No. 1029.

28. Хайрулина Е.А. Техногенная трансформация ландшафтно-геохимических процессов в районе добычи калийно-магниевых солей // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 41–45.

29. Базилевич Н.И., Панкова Е.И. Опыт классификации почв по засолению // Почвоведение. 1968. № 11. С. 3–16.

30. Панкова Е.И., Ямнова И.А. О диагностике солончаков // Почвоведение. 1993. № 10. С. 28–38.

31. Procedures for soil analysis / Ed. L.P. van Reeuwijk. Wageningen: ISRIC, 2002. 119 p.

32. Кокотов Ю.А., Сухачёва Е.Ю., Апарин Б.Ф. Поле кислотности, как ионообменных систем, и диагностика генетических горизонтов // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1448–1459.

## References

1. Khayrulina E.A., Novoselova L.V., Poroshina N.V. Natural and anthropogenic sources of soluble salts on the territory of the Upper Kama potash deposit // Geographical Bulletin. 2017. No. 1. P. 93–101 (in Russian). doi: 10.17072/2079-7877-2017-1-93-101

2. Vodyanitskii Yu.N., Avetov N.A., Savichev A.T., Trofimov S.Ya. Characterization of technogeochemical anomalies in peat soils contaminated with slimes in the oil production areas of the Central Ob region // Agrochemistry. 2012. No. 11. P. 82–90 (in Russian).

3. Svanidze I.G., Moiseenko T.I., Yakimov A.S., Soromotin A.V. Impact of technogenic halogenesis on water catchment landscapes of river valleys and water systems: case study of the south of Tyumen province // Water Resources. 2014. V. 41. No. 1. P. 94–103 (in Russian). doi: 10.7868/S0321059614010118

4. Baturin E.N., Menshikova E.A., Blinov S.M., Naumov D.Yu., Belkin P.A. Problems of the development of the world largest potassium deposits // Modern problems of science and education. 2012. No. 6 [Internet resource] <https://science-education.ru/ru/article/view?id=7513&ysclid=lo44n8xz2c955874412> (Accessed: 17.05.2023) (in Russian).

5. Eremchenko O.Z., Mitrakova N.V., Shestakov I.E. Natural and technological organization of a soil cover of the area of influence of the saltdumps and sludge in the Solikamsk-Berezniki economic area // Bulletin of Perm University. Biology series. 2017. V. 3. P. 311–320 (in Russian).

6. Simonova Yu.V., Rusakov A.V., Ryumin A.G. Salt-affected soils of the Rostov lowland (Yaroslavl' region): morphology, genesis and dynamics of salinization in the annual hydrological cycle // Dokuchaev Soil Bulletin. 2018. V. 93. P. 40–74 (in Russian). doi: 10.19047/0136-1694-2018-93-40-74

7. Hulisz P., Piernik A. Soil affected by soda industry in Inowrocław // Technogenic soils of Poland. Toruń: Polish Society of Soil Science, 2013. P. 125–140.

8. Khairulina E.A. Landscape formation under conditions of technogenic halogenesis / E.A. Khairulina: abstract. diss ... doc. geogr. sci. Tomsk, 2022. 43 p. (in Russian).

9. Mikailov F. Modeling of some soil processes // Bulletin of the Altai State Agricultural University. 2014. V. 7. No. 117. P. 59–64 (in Russian).

10. Kuyukina M.S., Ivshina I.B., Osipenko M.A., Nyashin Yu.I., Korostina O.A. Model of oil laundering of contaminated soil under the influence of *Rhodococcus* biosurfactant // Russian Journal of Biomechanics. 2006. V. 10. No. 1. P. 59–67 (in Russian).

11. Rogovaya O.G. Ecological modeling. Sankt-Peterburg: Book House, 2007. 104 p. (in Russian).

12. Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M.A., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S., Zudin S.L., Zubkova E.V.

- Dynamic modeling of soil organic matter transformation processes. Simulation model ROMUL / Ed. B.F. Aparin. Sankt-Peterburg: SPbU Publishing House, 2007. 96 p. (in Russian).
13. Hansen S., Abrahamsen P., Petersen C.T., Styczen M. Daisy: Model use, calibration and validation // Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers. 2012. V. 55. No. 4. P. 1315–1333.
  14. Coleman K., Jenkinson D.S., Crocker G.J., Grace P.R., Klir J., Körschens M., Poulton P.R., Richter D.D. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 // Geoderma. 1997. V. 81. No. 1–2. P. 29–44. doi: 10.1016/S0016-7061(97)00079-7
  15. Van Oijen M., Beer C., Cramer W., Rammig A., Reichstein M., Rolinski S., Soussana J.-F. A novel probabilistic risk analysis to determine the vulnerability of ecosystems to extreme climatic events // Environmental Research Letters. 2013. No. 8. Article No. 015032. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015032
  16. Puzachenko Yu.G., Moshkin A.V. Information and logical analysis in medical and geographical research // Science outcomes. Medical geography. No. 3. Moskva: VINITI, 1969. P. 5–74 (in Russian).
  17. Puzachenko Yu.G., Karpachevsky L.O., Vznuzdaev N.A. Possibilities of using information and logical analysis when studying soil using the example of its moisture content. Patterns of spatial variation in soil properties and information and statistical methods for their study. Moskva: Nauka, 1970. P. 103–121 (in Russian).
  18. Pankova T.I., Masyutenko N.P., Koltysheva E.V. Opportunities of soil fertility modelling on the basis of information-logic analysis // Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2018. No. 4. P. 8–16 (in Russian).
  19. Mathematical modeling in the classification of soil systems / Ed. G.G. Morkovkin. Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2020. 71 p. (in Russian).
  20. Sairanova P.Sh., Samofalova I.A. Acid-basic properties of mountain soils in the North and Middle Urals // Anthropogenic transformation of the natural environment. 2018. No. 4. P. 94–97 (in Russian).
  21. Samofalova I.A. Information-logical analysis of soil cover differentiation of the altitude geosystems in the Middle Urals // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2017. No. 11 (157). P. 105–114 (in Russian).
  22. Pivovarova E.G., Luetziger A.O., Usenko S.V., Garkusha A.A. Development of a private model of chernozem soil fertility management in conditions of climatic changes in the Altai Ob region // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2012. No. 11 (97). P. 34–38 (in Russian).
  23. He N.Y., Minenko A.V. Information and logical analysis in the study of the relationship between production potential and economic efficiency of agricultural organizations // Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2011. V. 5. No. 79. P. 108–113 (in Russian).
  24. Classification and diagnostics of soils in Russia / Eds. L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimova. Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p. (in Russian).
  25. Information-logical analysis program developed by scientists from the Department of Soil Science and Agrochemistry of the Altai State Agrarian University under the leadership of Professor L.M. Burlakova [Internet resource] <https://www.asau.ru/ru/2015-03-26-04-56-50/aktualnye-nauchno-issledovatel'skie-razrabotki> (Accessed: 09.01.2023).
  26. Burlakova L.M. Complexes of parameters of various levels of soil fertility and ways of its management in the agricultural system in the Altai Territory // Problemy regional'nogo prirodopolzovaniya i okhrany okruzhayushchey sredy v Altayskom krae v svete resheniy XXVI sezdа KPSS: tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii. Barnaul, 1983. P. 92–96 (in Russian).
  27. Karavaeva T., Menshikova E., Belkin P., Zhdakov V. Features of arsenic distribution in the soils of potash mines // Minerals. 2022. V. 12. No. 8. Article No. 1029. doi: 10.3390/min12081029
  28. Khairulina E.A. Technogenic transformation of landscape-geochemical processes in the area of potassium and magnesium salts mining // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 3. P. 41–45 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-3-041-045
  29. Bazilevich N.I., Pankova E.I. Experience in classifying soils by salinity // Soil Science. 1968. No. 11. P. 3–16 (in Russian).
  30. Pankova E.I., Yamnova I.A. On the diagnostics of solonchaks // Soil Science. 1993. No. 10. P. 28–38 (in Russian).
  31. Procedures for soil analysis / Ed. L.P. van Reeuwijk. Wageningen: ISRIC, 2002. 119 p.
  32. Kokotov Yu.A., Sukhacheva E.Yu., Aparin B.F. Acidity field of soils as ion-exchange systems and the diagnostics of genetic soil horizons // Soil Science. 2014. No. 12. P. 1448–1459 (in Russian).

## Новый гидрогелевый комплекс с иммобилизованными клетками микроводорослей для удаления аммоний и фосфат-ионов из сточных вод

© 2023. Д. В. Тарабукин, к. б. н., н. с., Е. Н. Патова, к. б. н., с. н. с.,  
И. В. Новаковская, 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: dim1822@yandex.ru

Предложен комбинированный гидрогелевый комплекс для иммобилизации клеток микроводорослей с целью удаления соединений азота и фосфора из модельной сточной воды. Новая полимерная матрица на основе альгината натрия и карбоксиметилцеллюлозы, полиакриловой кислоты сохраняла целостность структуры в растворе с повышенным содержанием аммоний и фосфат-ионов, а также оказалась устойчивой к щелочным металлам. Условия формирования гидрогелевого комплекса позволили не только сохранить жизнеспособность включаемых клеток микроводорослей на примере *Tetrademus obliquus* и *Chlorella vulgaris*, но и обеспечили их размножение и развитие в полимерной матрице. Выявлено, что в процессе поглощения азота участвуют главным образом живые клетки микроводорослей. Наибольший вклад в удаление фосфора внесла полимерная составляющая гидрогелевого комплекса. Обнаружено влияние карбонат-ионов на процесс поглощения азота клетками микроводорослей.

**Ключевые слова:**  $[Ca^{2+}-Fe^{3+}]$  гидрогелевые комплексы, микроводоросли, жизнеспособность клеток, удаление азота и фосфора, модельные сточные воды.

## New hydrogel complex with immobilized microalgae cells for removal ammonium and phosphate ions from wastewater

© 2023. D. V. Tarabukin ORCID: 0000-0001-8572-4902  
E. N. Patova ORCID: 0000-0002-9418-1601  
I. V. Novakovskaya ORCID: 0000-0001-5056-9965  
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: dim1822@yandex.ru

The aim of the work was to create a stable hydrogel complex containing microalgae cells to remove ammonium and phosphate ions from an experimental solution simulating domestic wastewater. A new polymer matrix based on sodium alginate and carboxymethyl cellulose, polyacrylic acid, retained the integrity of the structure in a solution with a high content of ammonium and phosphate ions, and also proved to be resistant to alkali metals. To increase the stability of hydrogel complexes, we proposed an increase in the number of chemical bonds in the polymer environment due to the crosslinking of alginate and carboxymethyl cellulose with  $Ca^{2+}$  and  $Fe^{3+}$  ions, as well as the introduction of an additional external stabilizer – cationic polyacrylamide. Due to the combination of several polymers, only slight swelling was observed and, as a result, the preservation of the hydrogel matrix in integrity for a long time. The two most commonly used algae in biotesting were selected for the experiment: *Tetrademus obliquus* and *Chlorella vulgaris* from the live microalgae strains collection of the Institute of Biology (Syktyvkar, Russia). The formation conditions of the hydrogel complex made it possible to preserve the viability, reproduction and development of the microalgae cells in the polymer matrix. The cell viability of both cultures was over 95%. It was found that living cells of microalgae are mainly involved in the process of nitrogen uptake. Microalgae immobilized cells, in the presence of carbonate ions, provided the best degree of removal of ammonium nitrogen, which reached 90%. The greatest contribution to the phosphorus removal (> 95%) was made by the polymer component of the hydrogel complex.

**Keywords:**  $[Ca^{2+}-Fe^{3+}]$  hydrogel complexes, microalgae, cell viability, nitrogen and phosphorus removal, model wastewater.

В результате хозяйственной деятельности человека образуется избыточное количество различных отходов, в том числе сточных вод, которые в дальнейшем попадают в природные экосистемы и нарушают устоявшиеся экологические связи. Применение системы очистных сооружений направлено на снижение содержания в сточных водах соединений азота, фосфора, органического углерода и прочих поллютантов. Основным способом удаления целевых элементов является биологическая очистка на основе активного ила [1]. Физико-химические методы удаления азота и фосфора имеют большой потенциал [2], но, несмотря на их скорость и эффективность, они не могут заменить использование биологических агентов.

В последнее время микроводоросли активно используют для биологической очистки сточных вод. Манипулируя различными режимами культивирования, можно оказывать существенное влияние на эффективность удаления целевых поллютантов. К примеру, показана возможность снижения концентрации аммонийного азота в городских сточных водах при использовании микроводорослей *Desmodesmus communis*, *Tetrademus obliquus* и *Chlorella protothecoides*, предварительно выращенных в условиях с пониженным содержанием питательных веществ [3]. Обнаружено влияние различных длин волн на удаление азота и фосфора в процессе культивирования пресноводной микроводоросли *Scenedesmus* sp. [4]. Оценён потенциал микроводорослей *Chlorella* sp., *Chlorococcum* sp. и *Neochloris* sp., культивируемых в речной воде, загрязнённой фармацевтическими стоками [5]. Все исследуемые штаммы в разной степени улучшили качество речной воды несмотря на наличие неблагоприятных факторов в процессе культивирования. Микроводоросли как отдельно, так и в сочетании с дрожжами сохраняли способность расти на сточной воде в нестерильных условиях [6], при совместном культивировании было достигнуто удаление аммоний и фосфат-ионов до 90%. Применение альгобактериальных консорциумов на основе *Chlorella vulgaris* и *Rhodobacter sphaeroides* показало эффективность удаления общего азота и фосфора на уровне 95% в сточных водах пищевых и животноводческих предприятий [7].

Стоит отметить, что биомасса микроводорослей, используемая в процессах очистки сточных вод, может быть дополнительным источником различных биологически активных веществ: каротиноидов, протеинов, пигментов, полисахаридов, ценных полиненасыщенных

жирных кислот [8–10], а также перспективна в качестве сырья для производства биотоплива [11–13]. При этом возникает проблема извлечения отработанной биомассы, которая легко решается за счёт применения иммобилизованных форм микроводорослей при обработке бытовых и промышленных стоков.

Включение живых клеток или ферментов в гели для получения гетерогенных катализаторов и систем утилизации токсичных веществ применяют достаточно давно [14, 15]. В ряде работ использованы гели на основе альгината натрия, так как они относительно дешевы и не токсичны [16–18]. Но такие гели отличаются слабой устойчивостью к хелатирующим агентам, щелочным металлам и набухают в процессе использования [15, 19]. Продолжительное использование сшитых альгинатных гидрогелей с иммобилизованными клетками микроводорослей без дополнительной стабилизации возможно лишь при отсутствии щелочных металлов в сточной воде, например, на отходах пищевых производств [20]. Неизбежное набухание, приводящее к утере прочности, можно частично нивелировать за счёт высоких концентраций альгината натрия или хлорида кальция, однако при этом могут создаваться менее благоприятные условия для размножения микроводорослей за счёт повышенной концентрации хлорид-ионов и увеличения плотности гидрогелевой среды [21, 22].

Повышение устойчивости полимерных комплексов на основе альгината натрия можно достичь за счёт сшивки N,N'-метилена-бис-акриламидом или обработкой цеолитами [23, 24]. Возможно также формирование слоя силикагеля на поверхности альгинатных комплексов, который даёт достаточно прочные структуры [25], но не позволяет оценить влияние такой обработки на живые клетки. Перспективным методом является стабилизация альгинатных комплексов хитозаном с последующей пришивкой биокатализатора через химическую модификацию [26]. Однако сам фермент находится снаружи, а внутренняя часть поликомплекса на основе альгината не используется. Стабилизация альгинатных комплексов полидиаллилдиметиламмоний хлоридом хоть и привела к долговременной устойчивости [27], но при этом вызывала значительную гибель заключённых внутри живых клеток водорослей, что потребовало введения микрочастиц оксида кремния и в целом усложнило систему. Поэтому актуальны работы по усовершенствованию альгинатных носителей для иммобилизации живых клеток

и ферментов при минимальных экономических затратах.

Цель работы – создание устойчивого гидрогелевого комплекса, содержащего клетки микроводорослей для удаления аммоний и фосфат-ионов из экспериментального раствора, имитирующего хозяйственно-бытовые сточные воды.

### Объекты и методы исследования

Для эксперимента были выбраны две наиболее часто используемые водоросли в биотестировании: *Tetrademus obliquus* и *Chlorella vulgaris* из Коллекции живых штаммов микроводорослей Института биологии Коми НЦ УрО РАН (СЯКОА). Накопительную культуру микроводорослей наращивали на жидкой питательной среде для зелёных водорослей 3 N BBM [28] с pH 6, при освещении 45  $\mu\text{моль м}^{-2}\text{с}^{-1}$  ФАР (фитолампа Uniell ULI-P11-35W/SPFR IP40 WHITE, Китай) и температуре 22–25 °С. Соотношение периодов день/ночь – 12/12 часов. Для эксперимента использовали культуры с оптической плотностью (ОП) *C. vulgaris* – 0,85 и *T. obliquus* – 0,76. Показатель ОП измеряли на спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония) при  $\lambda = 680/720$  нм в 5 мм кювете.

*Tetrademus obliquus* (Turpin) M.J. Wynne (СЯКОА Ch-055-12) – водоросль из отдела Chlorophyta. Штамм СЯКОА Ch-055-12 выделен из аэротенков станции биологической очистки лесопромышленного комплекса г. Сыктывкар, Республика Коми. Для штамма СЯКОА Ch-055-12 выполнен филогенетический анализ на основе нуклеотидных последовательностей 18S рДНК и ITS1–ITS2. Фрагменты последовательностей штамма представлены в GenBank под номером KJ627791.

*Chlorella vulgaris* (СЯКОА Ch-011-10) – одноклеточная водоросль из отдела Chlorophyta. Штамм СЯКОА Ch-011-10 выделен из антропогенно-нарушенной почвы (стойбище оленей) на Приполярном Урале в 2010 г. Для штамма СЯКОА Ch-011-10 выполнен филогенетический анализ на основе нуклеотидных последовательностей 18S рДНК. Фрагмент последовательности штамма представлен в GenBank под номером MZ435753.

В качестве компонентов гелевых комплексов были использованы: карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), альгинат натрия и полиакриловая кислота (ПАК). Компоненты полимерной суспензии: 2% раствор КМЦ, 1%

альгинат натрия, культуральная жидкость исследуемого вида микроводоросли, 0,1% раствор ПАК смешивали в соотношении 1:1:1:0,5, соответственно. Приготовленную смесь в виде капель дозировали в подкисленный хлоридом железа(III) раствор, содержащий 2% ацетат кальция и 0,1% катионный полиакриламид (кПАА). Далее полимерные шарики с клетками вынимали и промывали дистиллированной водой. Стабильность полимерных шариков и сохранение жизнеспособности иммобилизованных клеток оценивали в течение нескольких суток при естественном освещении и температуре  $25 \pm 2$  °С в чашках Петри, наполненных раствором 0,1 М калий-фосфатного буфера (pH 6,2). Оценку жизнеспособности микроводорослей проводили с помощью распознавания живых и мёртвых клеток [29] под флуоресцентным микроскопом Mikmed 2 (версия 11) в проходящем и отражённом свете с камерой RisingCam E3 Sony IMX226 12 MP; программное обеспечение – RisingView. В работе использовали объективы с увеличением 40 $\times$  и 100 $\times$ . Подсчитывали долю мёртвых клеток относительно общего их числа [30].

Для эксперимента по обработке модельной сточной воды свежеприготовленные гидрогелевые шарики с иммобилизованными клетками перед началом эксперимента были выдержаны в 0,01 М натрий-цитратном буфере (pH 6,0) в течение 3 суток. Затем дважды промыты дистиллированной водой. Был приготовлен исходный раствор модельной сточной воды объёмом 200 см<sup>3</sup>, содержащий 30 мг NH<sub>4</sub>Cl, 40 мг KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 10 мг MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O и 10 мг ZnCl<sub>2</sub>. Готовый раствор разливали по 30 см<sup>3</sup> в шесть пластиковых флаконов (50 см<sup>3</sup>). В две ёмкости вносили по 2 см<sup>3</sup> исходной культуральной жидкости исследуемого вида микроводоросли, в одну из них добавляли 10 мг NaHCO<sub>3</sub>. В другие две ёмкости вносили полимерные комплексы (примерно по 150 гидрогелевых шариков) с иммобилизованными клетками исследуемого вида микроводоросли, в одну из них добавляли 10 мг NaHCO<sub>3</sub>. Две оставшиеся ёмкости служили контролем, причём в одну помещали примерно 150 гидрогелевых шариков без микроводорослей. В течение восьми суток оценивали динамику поглощения аммоний и фосфат-ионов из солевой среды как свободными, так и иммобилизованными клетками микроводорослей. Объём раствора во всех ёмкостях поддерживался на одинаковом уровне при температуре  $25 \pm 2$  °С, газообмен в колбах обеспечивала микропористая мем-

брана (0,2 мкм). Концентрацию ионов аммония определяли согласно методике, описанной в работе [31], фосфат-ионов – согласно [32]. Все варианты опытов были выполнены в трёх повторностях. Для статистической обработки полученных результатов использовалась программа Microsoft Excel.

### Результаты и обсуждение

Для повышения устойчивости гидрогелевых комплексов нами было предложено увеличение числа химических связей в полимерном окружении за счёт сшивки альгината и КМЦ ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ , а также внесения дополнительного внешнего стабилизатора кПАА. Включение в комплекс ПАК также целесообразно в связи с повышением вязкости её растворов за счёт увеличения степени нейтрализации карбоксильных групп щелочными или переходными металлами, а также проявления полиэлектролитных свойств [33, 34]. Частичная замена альгината натрия на более дешёвую КМЦ была проведена из экономических соображений. С учётом формирования

слоистой структуры полимерных комплексов [35], предполагаемое строение полимерного комплекса можно представить в виде следующей схемы (рис. 1).

В отличие от гидрогелевых комплексов на основе одного альгината натрия, предложенные нами комплексы обладают структурой с гораздо большей устойчивостью к щелочным металлам. Более того, за счёт сочетания нескольких полимеров наблюдалось лишь незначительное набухание и сохранение их целостности в течение длительного времени (рис. 2).

При этом гидрогелевые комплексы формировались при физиологически приемлемых значениях pH (5,5–6,0), поэтому были пригодны для захвата живых клеток. После процедуры включения микроводорослей *T. obliquus* и *C. vulgaris* в гидрогелевые комплексы они сохранили высокую жизнеспособность, при этом наблюдали интенсивное деление и рост клеток водорослей в течение 8 сут (рис. 3). В гидрогелевых комплексах доля мёртвых клеток составляла около 5% для обоих штаммов. Следовательно, исследо-

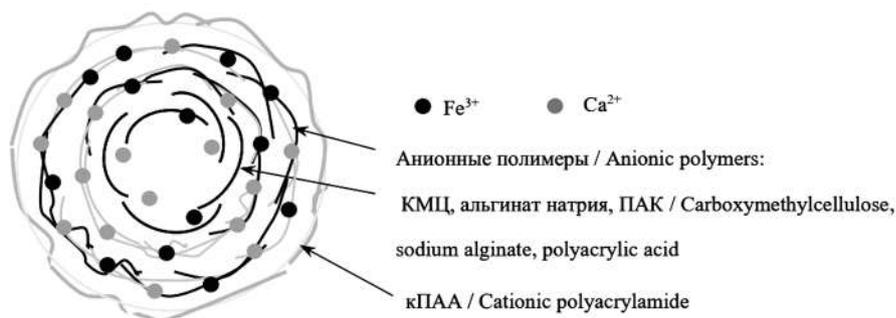


Рис. 1. Схема строения гидрогелевого комплекса  
 Fig. 1. Structure scheme of the hydrogel complex

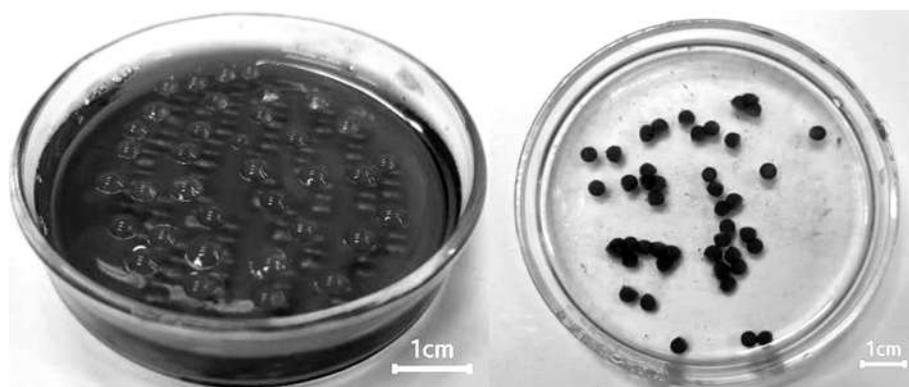
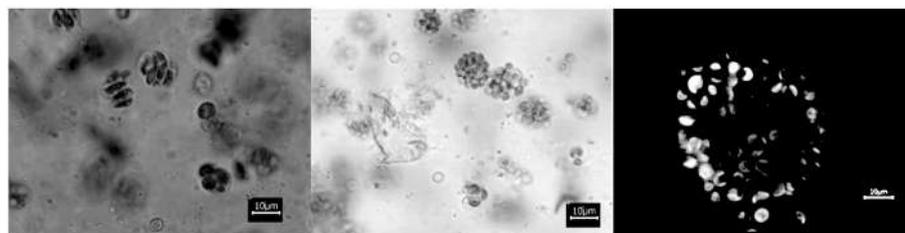
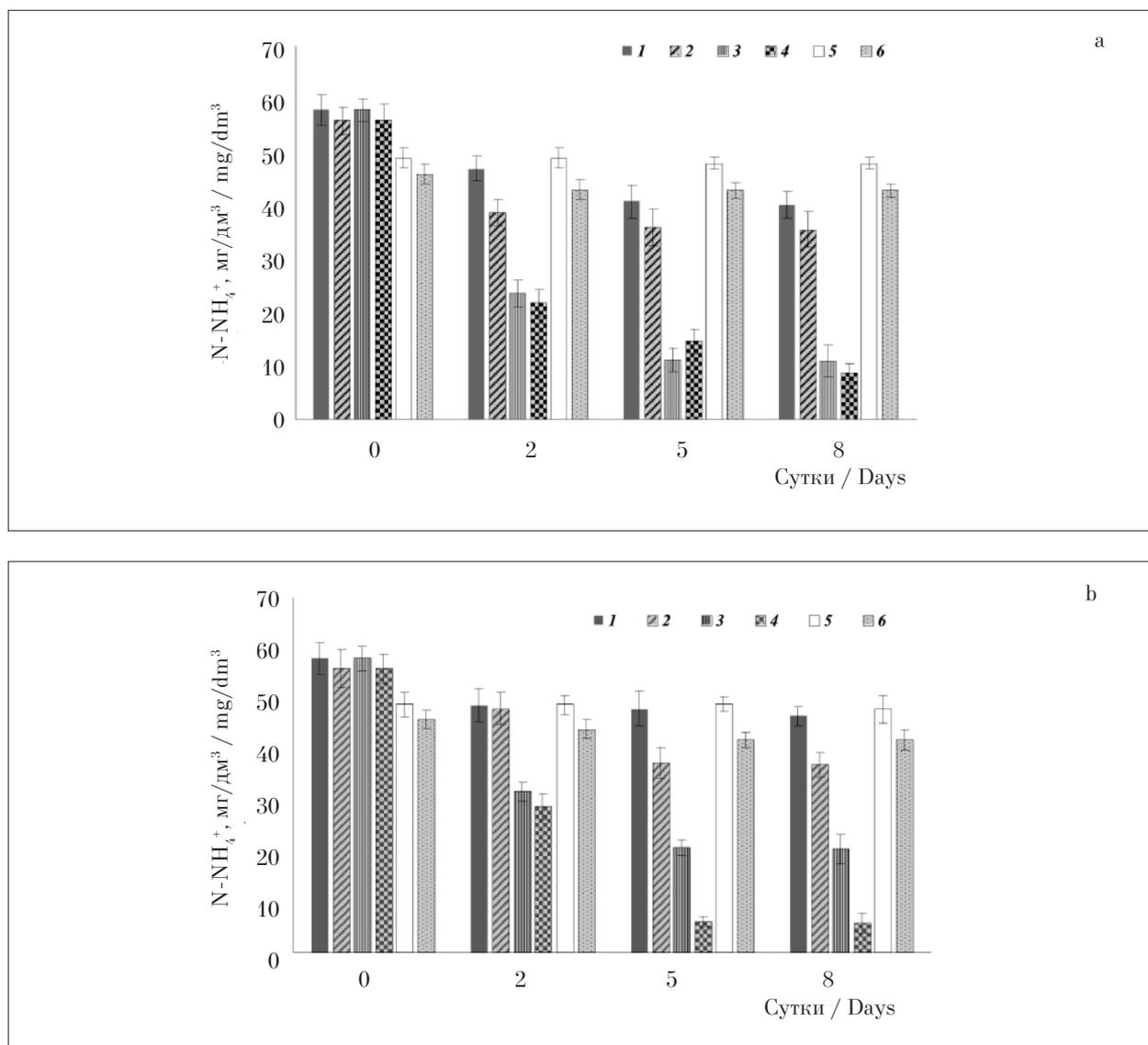


Рис. 2. Полимерные шарики с включёнными клетками микроводорослей (на примере *Chlorella vulgaris*, слева – свежеприготовленные, справа – после 8 суток выдержки в калий-фосфатном буфере)  
 Fig. 2. Polymer beads with included microalgae cells (by the example of *Chlorella vulgaris*, on the left freshly prepared, on the right after 8 days of exposure in potassium phosphate buffer)



**Рис. 3.** Колонии микроводорослей *Tetradesmus obliquus* (слева) и *Chlorella vulgaris* (посередине) в матрице гидрогелевых комплексов на 3 сутки, (микроскопия в проходящем свете); свечение хлорофилла живых клеток *Chlorella vulgaris* (люминесцентная микроскопия)  
**Fig. 3.** Colonies of microalgae *Tetradesmus obliquus* (left) and *Chlorella vulgaris* (in the middle) in the matrix of hydrogel complexes on the 3rd day, (microscopy in transmitted light); luminescence of chlorophyll in living cells of *Chlorella vulgaris* (fluorescence microscopy)



**Рис. 4.** Динамика изменения концентрации N–NH<sub>4</sub><sup>+</sup> при различных режимах культивирования *Tetradesmus obliquus* (a) и *Chlorella vulgaris* (b): 1 – свободные клетки микроводорослей, 2 – иммобилизованные клетки микроводорослей, 3 – свободные клетки микроводорослей + NaHCO<sub>3</sub>, 4 – иммобилизованные клетки микроводорослей NaHCO<sub>3</sub>, 5 – контроль, 6 – полимерные комплексы без клеток микроводорослей  
**Fig. 4.** Dynamics of changes in the concentration of N–NH<sub>4</sub><sup>+</sup> under different modes of cultivation of *Tetradesmus obliquus* (a) and *Chlorella vulgaris* (b): 1 – free cells of microalgae, 2 – immobilized cells of microalgae, 3 – free cells of microalgae + NaHCO<sub>3</sub>, 4 – immobilized cells of microalgae + NaHCO<sub>3</sub>, 5 – control, 6 – polymer complexes without cells microalgae

ванные культуры можно считать здоровыми, так как жизнеспособность клеток была более 95% [29].

В результате проведённого исследования было выявлено, что свободные и иммобилизованные клетки обеих культур микроводорослей были способны поглощать  $N-NH_4^+$ . Снижение концентрации аммоний-ионов в модельной сточной воде на 8 сут для свободных клеток *T. obliquus* составило около 30%, для иммобилизованных – 35% (рис. 4). В варианте со свободными клетками *C. vulgaris* снижение концентрации аммония было

в пределах 20%, иммобилизованными – 35% (рис. 4). Внесение дополнительных гидрокарбонат-ионов существенно увеличило степень удаления  $N-NH_4^+$  как свободными клетками, так и включёнными в гидрогелевые комплексы ( $p < 0,05$ ). Для *T. obliquus* остаточная концентрация  $N-NH_4^+$  составила 15%, для свободных клеток – 20%. Для *C. vulgaris* разница между значениями для свободных и иммобилизованных клеток была более выражена и составила 35 и 10%, соответственно. Необходимо отметить частичное поглощение  $N-NH_4^+$  самой матрицей гидрогеля без клеток

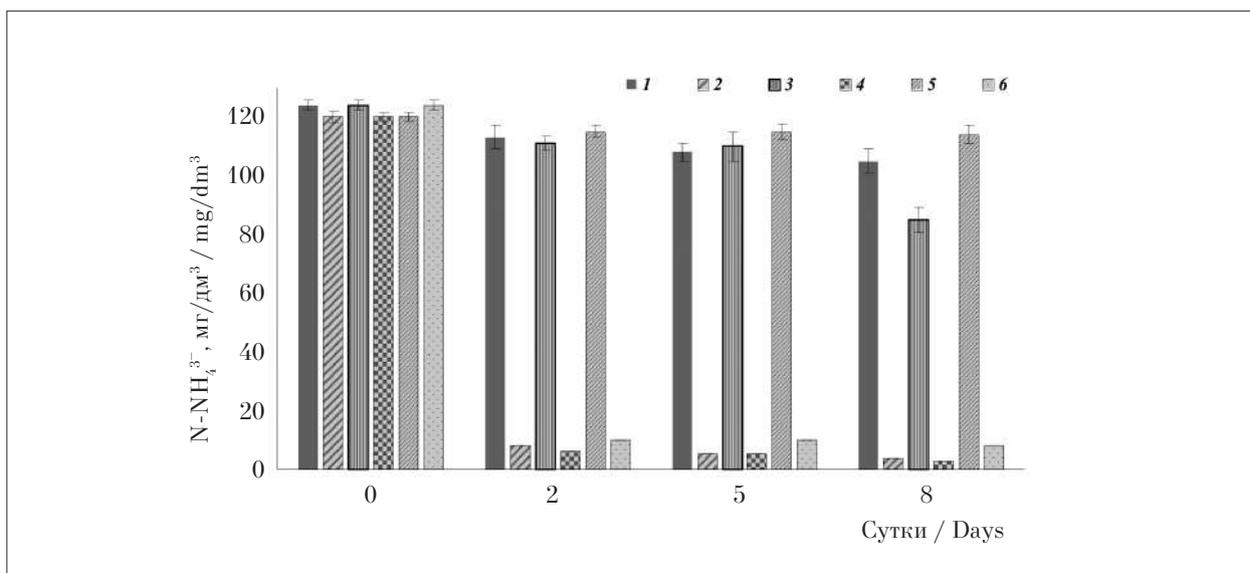
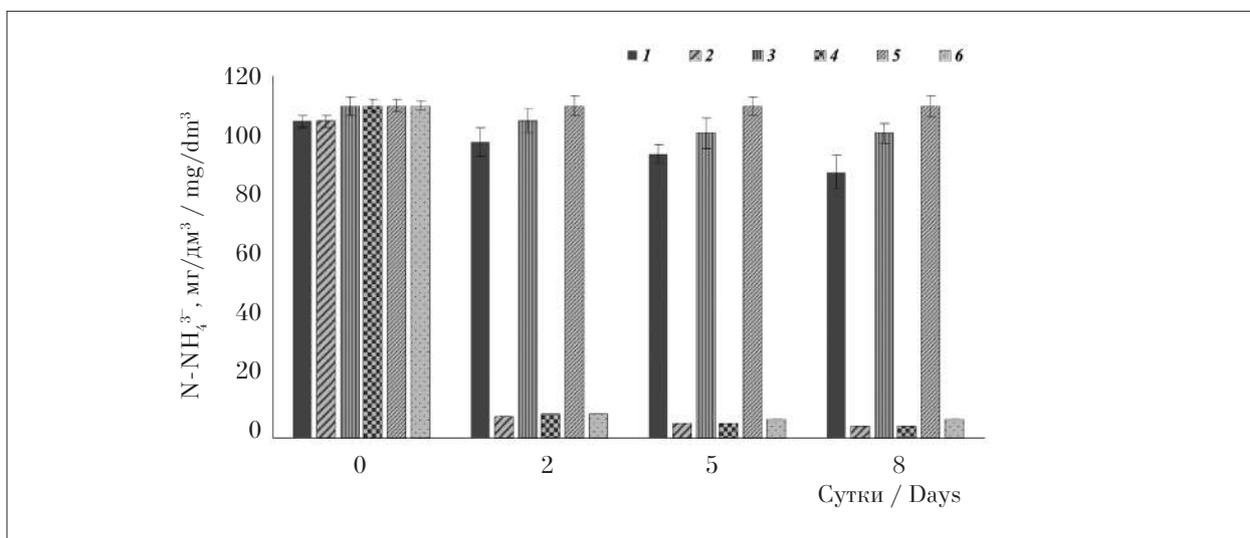


Рис. 5. Динамика изменения концентрации  $P-PO_4^{3-}$  при различных режимах культивирования *Tetrademus obliquus* (a) и *Chlorella vulgaris* (b): 1 – свободные клетки микроводорослей, 2 – иммобилизованные клетки микроводорослей, 3 – свободные клетки микроводорослей +  $NaHCO_3$ , 4 – иммобилизованные клетки микроводорослей  $NaHCO_3$ , 5 – контроль, 6 – полимерные комплексы без клеток микроводорослей

Fig. 5. Dynamics of changes in the concentration of  $P-PO_4^{3-}$  under different modes of cultivation of *Tetrademus obliquus* (a) and *Chlorella vulgaris* (b): 1 – free cells of microalgae, 2 – immobilized cells of microalgae, 3 – free cells of microalgae +  $NaHCO_3$ , 4 – immobilized cells of microalgae +  $NaHCO_3$ , 5 – control, 6 – polymer complexes without cells microalgae

микроводорослей. Однако, как отмечено ранее другими исследователями [36], сугубо химическое связывание азота достаточно сильно зависит от внешних факторов, в том числе посторонних веществ, поэтому биологическое поглощение рассматривалось нами как более приоритетное.

Таким образом, добавка гидрокарбоната в виде натриевой соли не повлияла на целостность гидрогелевых комплексов, но при этом значительно усилила эффекты удаления свободного азота. Наиболее вероятный механизм усиления эффекта удаления  $N-NH_4^+$  связан с преобразованием гидрокарбонатов в свободный  $CO_2$  с последующей интенсификацией процессов фотосинтеза [37]. Как следствие, ускоренный фотосинтез параллельно обеспечивает энергию для усиленной ассимиляции  $N-NH_4^+$  и биосинтеза аминокислот [38].

Анализ динамики поглощения  $P-PO_4^{3-}$  свободными клетками микроводорослей выявил снижение концентрации ионов в пределах 15–20%, причём наличие дополнительных карбонат-ионов особой роли не играло (рис. 5). Наибольшее снижение концентрации фосфатов произошло на 8 сут (до 25%) для *C. vulgaris* в присутствии карбонат-ионов. Напротив, удаление (> 95%)  $P-PO_4^{3-}$  из раствора было отмечено для всех вариантов с иммобилизованными микроводорослями ( $p < 0,01$ ). Однако сходные значения по степени удаления  $P-PO_4^{3-}$  для контрольных вариантов подводят к выводу о химической природе связывания фосфора. Таким образом, гидрогелевый комплекс служил адсорбентом для фосфора [39], обеспечивая его локальную концентрацию в сфере размножающихся клеток микроводорослей. В дальнейшем фосфаты могут быть переведены во внутриклеточные полифосфаты [40].

### Заключение

Новый гидрогелевый комплекс для обработки сточных вод с целью удаления азота и фосфора за счёт эффективного сочетания альгината натрия, КМЦ, ПАК и кПАА оказался устойчив к щелочным металлам, сохранял стабильность в течение длительного времени и был не токсичен для водорослей. Клетки двух штаммов микроводорослей были успешно включены в полимерную матрицу, где сохраняли способность к размножению и росту. Иммобилизованные клетки микроводорослей оказались наиболее эффективны в процессе поглощения  $N-NH_4^+$ , которое было

усилено за счёт добавки дополнительных карбонат-ионов.  $P-PO_4^{3-}$  связывался с компонентами полимерной матрицы более, чем на 90% за счёт химических взаимодействий. Длительная сохранность структуры гидрогелевых комплексов позволяет в дальнейшем извлекать накопленную биомассу микроводорослей из жидкой фазы для последующей переработки. Компоненты таких комплексов дешевы, состоят из биоразлагаемых, нетоксичных полимеров, а факт ассимиляции азота и аккумуляции фосфора позволяет рассматривать гидрогелевые комплексы с иммобилизованными клетками микроводорослей в качестве органоминеральных удобрений. С другой стороны, биомасса микроводорослей из выработавших свой ресурс гидрогелевых комплексов может быть рассмотрена как потенциальный источник недорогого сырья для получения биотоплива.

*Работа выполнена при поддержке Государственного задания 122040600019-1 и 122040600026-9.*

### References

1. Zhmur N.S. Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aerotanks. Moskva: AKVAROS, 2003. 507 p. (in Russian).
2. Shao Q., Zhang Y., Liu Z., Long L., Liu Z., Chen Y., Hu X.-M., Lu M., Huang L.-Z. Phosphorus and nitrogen recovery from wastewater by ceramicsite: Adsorption mechanism, plant cultivation and sustainability analysis // Science of The Total Environment. 2022. V. 805. Article No. 150288. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150288
3. Lavrinovičs A., Mežule L., Juhna T. Microalgae starvation for enhanced phosphorus uptake from municipal wastewater // Algal Research. 2020. V. 52. Article No. 102090. doi: 10.1016/j.algal.2020.102090
4. Kim T.-H., Lee Y., Han S.-H., Hwang S.-J. The effects of wavelength and wavelength mixing ratios on microalgae growth and nitrogen, phosphorus removal using *Scenedesmus* sp. for wastewater treatment // Biore-source Technology. 2013. V. 130. P. 75–80. doi: 10.1016/j.biortech.2012.11.134
5. Singh A., Ummalya S.B., Sahoo D. Bioremediation and biomass production of microalgae cultivation in river water contaminated with pharmaceutical effluent // Biore-source Technology. 2020. V. 307. Article No. 123233. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123233
6. Walls L.E., Velasquez-Orta S.B., Romero-Frasca E., Leary P., Noguez I.Y., Ledesma M.T.O. Non-sterile heterotrophic cultivation of native wastewater yeast and microalgae for integrated municipal wastewater treatment and bioethanol production // Biochemical Engineering

- Journal. 2019. V. 151. Article No. 107319. doi: 10.1016/j.bej.2019.107319
7. You K., Ge F., Wu X., Song K., Yang Z., Zhang Q., Liu Y., Ruan R., Zheng H. Nutrients recovery from pig-gery wastewater and starch wastewater via microalgae-bacteria consortia // *Algal Research*. 2021. V. 60. Article No. 102551. doi: 10.1016/j.algal.2021.102551
  8. Levasseur W., Perré P., Pozzobon V. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification // *Biotechnology Advances*. 2020. V. 41. Article No. 107545. doi: 10.1016/j.biotechadv.2020.107545
  9. Nishshanka G.K.S.H., Liyanaarachchi V.C., Premaratne M., Nimarshana P.H.V., Ariyadasa T.U., Kornaros M. Wastewater-based microalgal biorefineries for the production of astaxanthin and co-products: Current status, challenges and future perspectives // *Bioresource Technology*. 2021. V. 342. Article No. 126018. doi: 10.1016/j.biortech.2021.126018
  10. Gorbunova S.Yu., Gudvilovich I.N. Cultivation of *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitler on waste water of poultry farms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 68–74 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-068-074
  11. Wang X., Zhang M., Liu S., Xu R.-L., Mou J., Qin Z.-H., Zhou Z.-G., Li H., Lin C.S.K., Sun Z. Synergistic bioconversion of lipids and carotenoids from food waste by *Dunaliella salina* with fulvic acid via a two-stage cultivation strategy // *Energy Conversion and Management*. 2021. V. 234. Article No. 113908. doi: 10.1016/j.enconman.2021.113908
  12. Godbole V., Pal M.K., Gautam P. A critical perspective on the scope of interdisciplinary approaches used in fourth-generation biofuel production // *Algal Research*. 2021. V. 58. Article No. 102436. doi: 10.1016/j.enconman.2021.113908
  13. Alva M.S., Pabello V.M.L., Ledesma M.T.O., Gómez M.J.C. Carbon, nitrogen, and phosphorus removal, and lipid production by three saline microalgae grown in synthetic wastewater irradiated with different photon fluxes // *Algal Research*. 2018. V. 34. P. 97–103. doi: 10.1016/j.algal.2018.07.006
  14. Immobilised cells and enzymes – A practical approach / Ed. J. Woodward. Oxford: IRL Press, 1985. 177 p.
  15. Smidsrod O., Skjak-Braek G. Alginate as immobilization matrix for cells // *Trends Biotechnology*. 1990. V. 8. P. 71–78. doi: 10.1016/0167-7799(90)90139-O
  16. Shen Y., Gao J., Li L., Municipal wastewater treatment via co-immobilized microalgal-bacterial symbiosis: microorganism growth and nutrients removal // *Bioresource Technology*. 2017. V. 243. P. 905–913. doi: 10.1016/j.biortech.2017.07.041
  17. Petrovič A., Simonič M. Removal of heavy metal ions from drinking water by alginate-immobilised *Chlorella sorokiniana* // *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2016. V. 13. P. 1761–1780. doi: 10.1007/s13762-016-1015-2
  18. Kondo K., Hirayama K., Matsumoto M. Adsorption of metal ions from aqueous solution onto microalga entrapped into Ca-alginate gel bead // *Desalination and Water Treatment*. 2013. V. 51. P. 4675–4683. doi: 10.1080/19443994.2013.770236
  19. Kostov G., Angelov M., Mihaylov I., Poncelet D. Mechanical properties of Ca-alginate beads for ethanol fermentation with immobilized yeast // *Revue de genie industriel*. 2010. V. 5. P. 25–35.
  20. Jesus G.C., Bastos R.G., Silva M.A. Production and characterization of alginate beads for growth of immobilized *Desmodesmus subspicatus* and its potential to remove potassium, carbon and nitrogen from sugarcane vinasse // *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 2019. V. 22. Article No. 101438. doi: 10.1016/j.bcab.2019.101438
  21. Petraitytė S., Šipailienė A. Enhancing encapsulation efficiency of alginate capsules containing lactic acid bacteria by using different divalent cross-linkers sources // *LWT – Food Science and Technology*. 2019. V. 110. P. 307–315. doi: 10.1016/j.lwt.2019.01.065
  22. Banerjee S., Tiwade P.B., Sambhav K., Banerjee C., Bhaumik S.K. Effect of alginate concentration in wastewater nutrient removal using alginate-immobilized microalgae beads: Uptake kinetics and adsorption studies // *Biochemical Engineering Journal*. 2019. V. 149. Article No. 107241. doi: 10.1016/j.bej.2019.107241
  23. Pourjavadi A., Barzegar Sh., Mahdavinia G.R. MBA-crosslinked Na-Alg/CMC as a smart full-poly-saccharide superabsorbent hydrogels // *Carbohydrate Polymers*. 2006. V. 66. No. 3. P. 386–395. doi: 10.1016/j.carbpol.2006.03.013
  24. Moghaddam S.A.E., Harun R., Mokhtar M.N., Zakaria R. Stability improvement of algal-alginate beads by zeolite molecular sieves 13X // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019. V. 132. P. 592–599. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.03.191
  25. Rehbein P., Raguz N., Schwalbe H. Evaluating mechanical properties of silica-coated alginate beads for immobilized biocatalysis // *Biochemical Engineering Journal*. 2019. V. 141. P. 225–231. doi: 10.1016/j.bej.2018.10.028
  26. Bedade D.K., Sutar Y.B., Singhal R.S. Chitosan coated calcium alginate beads for covalent immobilization of acrylamidase: Process parameters and removal of acrylamide from coffee // *Food Chemistry*. 2019. V. 275. P. 95–104. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.09.090
  27. Zhang B.B., Wang L., Charles V., Rooke J.C., Su B.L. Robust and biocompatible hybrid matrix with controllable permeability for microalgae encapsulation // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2016. V. 8. No. 14. P. 8939–8946. doi: 10.1021/acsami.6b00191
  28. Andersen R.A. *Algal culturing techniques*. Elsevier/Academic, Burlington/San & Diego/London, 2005. 578 p.
  29. Kazeev K.Sh., Kolesnikov S.I., Akimenko Yu.V., Dadenko E.V. Methods for biodiagnostics of terrestrial ecosystems. Rostov na Donu: Iz-vo Yuzhnogo federalnogo universiteta, 2016. 356 p. (in Russian).

30. Mitroshina E.V., Mishchenko T.A., Vedunova M.V. Determination of viability of cell cultures. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet im. N.I. Lobachevskogo, 2015. 21 p. (in Russian).
31. Tarabukin D.V. Assessment of the lowland bog biomass for ex situ remediation of petroleum-contaminated soils // *Environments*. 2020. V. 7. No. 86. P. 1–11. doi: 10.3390/environments7100086
32. Nagul E.A., Kolev S.D., McKelvie I.D., Worsfold P.J. The molybdenum blue reaction for the determination of orthophosphate revisited: opening the black box // *Analytica Chimica Acta*. 2015. V. 890. P. 60–82. doi: 10.1016/j.aca.2015.07.030
33. Yokoi H., Nomoto E., Ikoma S. Reversible formation of iron(III) ion clusters in the poly(acrylic acid)-Fe<sup>3+</sup> complex gel with changes in the water content // *Journal of Materials Chemistry*. 1993. V. 3. No. 4. P. 389–392. doi: 10.1039/JM9930300389
34. Smitha B., Sridhar S., Khan A.A. Polyelectrolyte complexes of chitosan and poly(acrylic acid) as proton exchange membranes for fuel cells // *Macromolecules*. 2004. V. 37. No. 6. P. 2233–2239. doi: 10.1021/ma0355913
35. Voo W.P., Ooi C.W., Islamc A., Tey B.T., Chan E.S. Calcium alginate hydrogel beads with high stiffness and extended dissolution behaviour // *European Polymer Journal*. 2016. V. 75. P. 343–353. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2015.12.029
36. Isik Z., Saleh M., Dizge N. Adsorption studies of ammonia and phosphate ions onto calcium alginate beads // *Surfaces and Interfaces*. 2021. V. 26. Article No. 101330. doi: 10.1016/j.surfin.2021.101330
37. Geng Y., Cui D., Yang L., Xiong Z., Pavlostathis S.G., Shaob P., Zhang Y., Luo X., Luo S. Resourceful treatment of harsh high-nitrogen rare earth element tailings (REEs) wastewater by carbonate activated *Chlorococcum* sp. microalgae // *Journal of Hazardous Materials*. 2022. V. 423. Article No. 127000. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127000
38. Liu X., Wang K., Zhang J., Wang J., Wu J., Peng F. Ammonium removal potential and its conversion pathways by free and immobilized *Scenedesmus obliquus* from wastewater // *Bioresource Technology*. 2019. V. 283. P. 184–190. doi: 10.1016/j.biortech.2019.03.038
39. Schambeck C.M., Costa R.H.R., Derlon N. Phosphate removal from municipal wastewater by alginate-like exopolymers hydrogels recovered from aerobic granular sludge // *Bioresource Technology*. 2021. V. 333. Article No. 125167. doi: 10.1016/j.biortech.2021.125167
40. Fu L., Li Q., Yan G., Zhou D., Crittenden J.C. Hormesis effects of phosphorus on the viability of *Chlorella regularis* cells under nitrogen limitation // *Biotechnology for Biofuels*. 2019. V. 12. Article No. 121. doi: 10.1186/s13068-019-1458-z

## Развитие методики расчёта нормативов допустимого сброса жидких производственных отходов с учётом региональных особенностей водных объектов

© 2023. Ю. А. Тунакова<sup>1</sup>, д. х. н., профессор, зав. кафедрой,  
С. В. Новикова<sup>1</sup>, д. т. н., профессор, В. С. Валиев<sup>2</sup>, с. н. с.,  
Е. В. Байбакова<sup>1</sup>, аспирант,

<sup>1</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А. Н. Туполева (КАИ),  
420126, Россия, г. Казань, ул. Четаева, д. 18,

<sup>2</sup>Институт проблем экологии и недропользования АН РТ,  
420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, д. 28,  
e-mail: juliaprof@mail.ru

Проблема регулирования сброса жидких отходов в водные объекты является актуальнейшей задачей и осуществляется на основе установления нормативов допустимого сброса (НДС). Многие авторы отмечают, что ключевой проблемой установления НДС является использование в качестве пороговых значений предельно допустимых концентраций (ПДК), определяемых без учёта региональных особенностей формирования состава природных вод и их способности к разбавлению сточных. Нами предложено развитие методики расчёта НДС, исходя из условия, что обеспечение отведения жидких отходов на уровне НДС не приведёт к изменению класса качества воды, определённого с использованием удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ). Обоснованы территориальные пороговые концентрации (ТПК) на основании анализа многолетних массивов данных гидрохимических наблюдений, которые позволяют учесть региональные особенности геохимического фона водных объектов, в том числе и по содержанию веществ двойного генезиса. А также, в неявном виде, ТПК позволяют учесть гидрологические и гидрохимические факторы, обеспечивающие способность природных вод к разбавлению стоков жидких отходов. Полученные ТПК предлагается использовать для расчёта допустимых концентраций веществ в сточных водах вместо ПДК. Нормативы допустимого сброса устанавливаются путём циклической итерации значений ТПК на 10%, с параллельным расчётом УКИЗВ, до перехода индекса в другой класс качества воды. В данной статье приведены результаты апробации предлагаемого развития методики расчёта НДС для жидких отходов от ОАО «Казанский завод синтетического каучука», сбрасываемых в р. Волга. Полученные результаты расчёта обосновывают более жёсткие требования к величине НДС для веществ преимущественно антропогенного происхождения. Для некоторых веществ двойного генезиса величина НДС получилась выше, что позволяет предъявлять более адекватные требования к водопользователям для очистки стоков жидких отходов.

**Ключевые слова:** жидкие производственные отходы, сброс, водные объекты, региональные особенности, пороговые концентрации, нормативы допустимого сброса, расчёт.

## Development of the methodology for calculating the standards of permissible discharge of liquid industrial wastes taking into account regional peculiarities of water bodies

© 2023. Y. A. Tunakova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8826-8639, S. V. Novikova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8207-1010,  
V. S. Valiev<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-8848-5326, E. V. Baibakova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-9281-0216

<sup>1</sup>Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI,  
18, Chetaeva St., Kazan, Russia, 420126,

<sup>2</sup>Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use  
of Tatarstan Academy of Sciences,  
28, Daurskaya St., Kazan, Russia, 420087,  
e-mail: juliaprof@mail.ru

regional peculiarities of formation of natural water composition and its ability to dilute wastewater. We have proposed the development of the methodology for calculating SPD, based on the condition that ensuring the disposal of liquid wastes at the level of permissible discharge standards will not lead to a change in the water quality class determined using the specific combinatorial index of water pollution (SCIWP). In the previous publication we have substantiated territorial threshold concentrations (TTC) based on the analysis of long-term data sets of hydrochemical observations, which allow us to take into account regional features of the geochemical background of water bodies, including the content of substances of dual genesis. They also implicitly allow taking into account hydrological and hydrochemical factors that ensure the ability of natural waters to dilute liquid waste effluents. The obtained TTCs are proposed to be used for calculation of permissible concentrations of substances in wastewater instead of MAC. SPD is established by cyclic iteration of TTC values by 10%, with parallel calculation of SCIWP, until the index is transferred to another water quality class. This paper presents the results of approbation of the proposed development of the methodology of SPD calculation for liquid waste from Open JSC “Kazan Synthetic Rubber Plant” discharged into the Volga River. The obtained calculation results make more stringent requirements to the value of SPD for substances mainly of anthropogenic origin. For some substances of dual genesis, the value of SPD was higher, which allows us to make more adequate requirements to water users for treatment of sewage effluents.

**Keywords:** liquid industrial waste, discharge, water bodies, regional peculiarities, threshold concentrations, standards of permissible discharge, calculation.

Жидкие отходы, образованные в ходе производственного процесса, и подлежащие сбросу в поверхностные водные объекты после очистки, являются одним из основных источников загрязнения поверхностных вод. В настоящее время основным государственным инструментом регулирования сбросов жидких отходов, образующихся на производствах, является установление нормативов допустимого сброса (НДС). Многие специалисты-практики выступают с конструктивной критикой действующего подхода обоснования НДС, отмечая, что при нормировании сбросов отдельных веществ и установлении антропогенной нагрузки на водные объекты применяются неадекватные требования, что является одной из причин неудовлетворительного качества поверхностных вод, в частности, основной водной артерии Российской Федерации – р. Волга [1–10]. Авторы подчёркивают, что действующая методика обоснования НДС не учитывает природные особенности водоёмов и водотоков, что приводит к тому, что для водопользователей, осуществляющих сброс жидких отходов, могут быть обоснованы неоправданно жёсткие нормативы, прежде всего, по веществам двойного генезиса. В частности, результаты мониторинговых исследований показывают, что в воде р. Волга фоновое содержание меди, марганца и цинка выше ПДК, что не влечёт за собой деградиционных процессов в речной экосистеме [9]. В силу природных особенностей водных объектов ПДК веществ двойного генезиса не могут быть обеспечены даже при введении жёстких требований к НДС. Фоновое содержание веществ выше уровня ПДК в поверхностных водных объектах привело к необходимости создания методик по расчёту НДС, ориентированных на применение фоновых концентраций [11].

В последние годы усиление научной дискуссии по вопросу обоснования НДС связано

с переходом на применение наилучших доступных технологий (НДТ). Действующая методика расчёта НДС (с применением ПДК) противоречит принципам нормирования на основе НДТ, а также принципам водоохранного законодательства [12]. Необходимость перехода к системе обоснования НДС на основе пороговых концентраций с учётом региональных особенностей формирования составов природных вод обоснована в работах отечественных и зарубежных учёных [13–16], что позволит учесть разнообразие состояний конкретных водных объектов, а также адекватно определять требуемые водоохранные мероприятия.

До сих пор научной проблемой остаётся обоснование пороговых концентраций, которые станут основой для расчёта НДС. В работе [17] нами обоснован подход для определения диапазонов территориальных пороговых концентраций (ТПК), отличающихся по значениям гидрохимических показателей водных объектов, с апробацией на конкретных участках Волжско-Камского бассейна. Был использован метод нейросетевого кластерного анализа и привлечена экспертная оценка для фиксации относительно стабильных во времени и пространстве гидрохимических состояний природных вод, использованные методы обоснованы в работах [18, 19].

Целью данного исследования является модернизация методики расчёта НДС для сбросов жидких отходов с использованием ТПК при условии, что это не приведёт к изменению класса качества воды, определённого по величине УКИЗВ.

#### Объекты и методы исследования

За основу расчёта НДС взята действующая методика, утверждённая Приказом МПР от 29.12.20 №1118 [11]. При расчёте допусти-

мой концентрации  $i$ -го вещества в сточных водах  $C_{НДС}$  мы предлагаем использовать вместо ПДК ТПК. Использование ТПК позволяет учесть региональные особенности геохимического фона по содержанию веществ двойного генезиса, например, сульфатов, марганца, железа, хлоридов, фенола, кальция, магния и т. д. В связи с тем, что эти показатели получены путём оценки конкретных водных объектов, их значения могут быть выше ПДК в силу специфики регионального фона этих веществ. Физически ТПК представляют собой расчётную величину, полученную путём статистической обработки многолетних массивов локализованных данных гидрохимического анализа, основанную на анализе квартильных размахов и медиан.

Мы предлагаем проводить расчёт допустимых концентраций веществ в сточных водах по формуле:

$$C_{НДС} = N \cdot (ТПК_i - C_{СР_i}) + C_{СР_i} \quad (1)$$

где  $ТПК_i$  – территориальная пороговая концентрация  $i$ -го вещества;  $C_{СР_i}$  – медианное (фоновое) значение концентрации  $i$ -го вещества;  $N$  – кратность общего разбавления жидких отходов в водном объекте, равная произведению кратности начального разбавления ( $n_n$ ) на кратность основного разбавления ( $n_o$ ).

При расчёте  $C_{НДС}$  по предлагаемому подходу использовалось медианное значение концентраций, принятое как фоновое. Распределение концентраций большей части гидрохимических показателей не соответствовало нормальному, в связи с чем была использована медиана.

Предлагаемая модернизация методики расчёта НДС при сбросе жидких отходов основана на предположении, что значимых изменений в гидрохимическом составе поверхностных вод не происходит, если сохраняется изначальный класс качества воды, определённый по УКИЗВ. Соответственно, значения допустимых концентраций при расчёте НДС должны подбираться таким образом, чтобы формирующиеся после сброса концентрации веществ, присутствующих в жидких отходах, сохраняли класс качества воды в водном объекте.

Этапы методики следующие:

- 1) нахождение значений ТПК в соответствии с подходом, изложенным в работе [18];
- 2) определение в соответствии с РД 52.24.622-2001 фоновых концентраций по

многолетним данным гидрохимических наблюдений;

3) проведение расчёта фонового значения УКИЗВ и определение класса качества воды по обязательному перечню веществ с добавлением к нему показателей, присутствующих в нормируемом сбросе жидких отходов, если они отсутствуют в обязательном перечне;

4) циклическая итерация значений ТПК на 10% с пошаговым вычислением величин УКИЗВ. Цикл осуществляется до тех пор, пока получаемый в результате расчёта УКИЗВ класс качества воды сохраняется в пределах исходного. Цикл прекращается при переходе индекса на другой класс качества. Величина 10% получена опытным путём, шаг в 10% от стартовой концентрации оказался наиболее оптимальным. Необходимо изменять концентрации только тех веществ, которые содержатся в составе жидких отходов.

5) фиксация предельных значений ТПК и использование их вместо ПДК;

6) расчёт допустимых значений концентраций на основе ТПК, полученных после всех итераций на предыдущем этапе;

7) расчёт значения НДС с использованием полученной допустимой концентрации для каждого вещества в составе жидких отходов.

Для расчёта фонового УКИЗВ использовали многолетний массив данных гидрохимических наблюдений в р. Волга (ниже 4,7 км г. Казани). Выбор объекта связан с тем, что этот участок Волги принимает сбросы жидких отходов разного состава. Наблюдения проводили с марта 2014 г. по декабрь 2021 г. по гидрохимическим показателям, включённым в перечень обязательных веществ для расчёта УКИЗВ: аммоний-ион, биохимическое потребление кислорода за пять суток ( $БПК_5$ ), железо, растворённый кислород, марганец, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, сульфаты, фенол, химическое потребление кислорода ( $ХПК$ ), хлориды, цинк, фосфат-ион, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), формальдегид, сульфиды.

Апробация предлагаемого развития методики расчёта НДС проведена на примере сбросов жидких отходов ОАО «Казанский завод синтетического каучука» (Выпуск 1: р. Волга). Комбинаторные индексы загрязнённости воды отдельных показателей рассчитаны по РД 52.24.643-2002 в соответствии с обязательным перечнем показателей. Расчёт УКИЗВ ( $S_{y0}$ ) проводили по формуле:

$$S_{\text{уд.}} = \frac{S_j}{N}, \quad (2)$$

где  $S_j$  – комбинаторный индекс загрязнённости воды в  $j$ -м створе;  $N$  – число учитываемых в оценке показателей.

Класс качества воды определён по шкале, представленной в РД 52.24.643-2002 (приложение В). Все гидрохимические показатели определяли с применением действующих методик измерений. Статистическую обработку результатов исследований проводили с применением программы Statistica 6.

### Результаты и обсуждение

Рассчитанное значение УКИЗВ сопоставляли со шкалой классов качества, представленной в РД 52.24.643-2002. Используя многолетний массив данных, получен УКИЗВ, соответствующий фоновым значениям гидрохимических показателей, который составил 2,9, что соответствует классу качества «загрязнённая За». Используя этапы методики, приведённые выше, получены ТПК, скорректированные с учётом УКИЗВ, и  $C_{\text{идс}}$ , которые позволяют сохранить класс качества воды при сбросе. В нашем случае, нам необходимо достигнуть, но не превысить, значения  $S_{\text{уд.}} = 4,0$ , так как это значение является границей между 3 и 4 классами качества воды.

В таблице 1 приведены значения ПДК, ТПК и медианные (фоновые) концентрации, обоснованные в соответствии с РД 52.24.622-2001.

Анализ результатов, представленных в таблице 1, показал, что полученные по описанным выше этапам методики значения ТПК по ионам аммония, нитритам, сульфатам, фосфатам и БПК<sub>5</sub> выше ПДК<sub>р/х.</sub> и медианных (фоновых) показателей.

По фосфат-ионам и медианное (фоновое) содержание, и ТПК значительно выше ПДК. В этом случае в соответствии с п. 15 Постановления Правительства РФ от 13.02.2019 № 149 при расчёте НДС должны быть применены значения нормативов, установленных на уровне значений показателей природных фоновых концентраций химических веществ в этом речном бассейне или его части.

Следует отметить, что в таблице 1 указаны пороги только сбрасываемых веществ в составе жидких отходов. По целому ряду сбрасываемых веществ (АПАВ, формальдегид, сульфиды, хлориды, нитраты) превышений ПДК не было достигнуто за многолетний период наблюдений, поэтому значения  $S_{\text{обобщ.}}$  этих веществ равно 0. В этом случае в качестве пороговых концентраций при расчёте НДС следует использовать действующие ПДК этих веществ.

В таблице 2 представлены результаты расчёта допустимых концентраций веществ в

Таблица 1 / Table 1

Значения территориальных пороговых концентраций в сравнении с предельными допустимыми концентрациями веществ для водных объектов рыбохозяйственного назначения и медианными (фоновыми) концентрациями / Indicators of territorial threshold concentrations in comparison with the maximum permissible concentrations of substances for fishery water bodies and median (background) concentrations

Вещества в составе жидких отходов, подлежащие нормированию Substances in the composition of liquid waste subject to regulation	ПДК <sub>р/х.</sub> Maximum permissible concentration	ТПК Territorial threshold concentration	$C_{\text{срп}}$ Median (background) concentration
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/л / mg/L	0,5	0,8	0,38
БПК <sub>5</sub> , мг/л / Biochemical oxygen demand, mg/ L	2	3,4	1,62
Нефтепродукты, мг/л / Petroleum products, mg/ L	0,05	0,0058	0,0028
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л / mg/ L	40	40	1,61
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/л / mg/ L	0,08	0,14	0,07
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л / mg/ L	100	114,6	54,5
Cl <sup>-</sup> , мг/л / mg/ L	300	300	11,3
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/л / mg/ L	0,2	0,55	0,26
СПАВ, мг/л / Synthetic surfactants, mg/ L	0,5	0,5	0,005
CH <sub>2</sub> O, мг/л / mg/ L	0,1	0,1	0,001
Сульфиды, мг/л / Sulfides, mg/ L	0,005	0,005	0,0001

Таблица 2 / Table 2

Допустимые концентрации веществ в сточных водах, содержащихся в жидких отходах завода  
Permissible concentrations of substances contained in the liquid waste of the plant

Вещество, содержащееся в жидких отходах Substance contained in liquid waste	Действующая методика According to the current methodology	Модернизированная методика Modernized methodology
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л / mg/L	99,09	113,46
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/л / mg/L	0,255	0,544
Cl <sup>-</sup> , мг/л / mg/L	294,23	294,23
Нефтепродукты, мг/л / Petroleum products, mg/L	0,049	0,0056
БПК <sub>5</sub> , мг/л / Biochemical oxygen demand, mg/L	3,202	3,359
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л / mg/L	39,23	39,23
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/л / mg/L	0,0797	0,13836
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/л / mg/L	0,4976	0,79
Сульфиды, мг/л / Sulfides, mg/L	0,0049	0,0049
CH <sub>2</sub> O, мг/л / mg/L	0,098	0,098
СПАВ, мг/л / Synthetic surfactants, mg/L	0,49009	0,4856

Таблица 3 / Table 3

Результаты расчёта нормативов допустимых сбросов по модернизированной и действующей методикам и фактическим сбросом (кг/ч) жидких отходов завода / Results of calculation of permissible discharge standards according to the experimental methodology and the current methodology and the actual discharge (kg/hour) of liquid wastes of the plant

Название вещества Name of the substance	Фактический сброс Actual reset	НДС <sub>дейст.</sub> / The standard of ermissible discharge is valid	НДС <sub>модер.</sub> / The standard of modernized methodology
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	80,362	159,263	182,36
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,37	0,4095	0,875
Cl <sup>-</sup>	15,59	472,8959	472,909
Нефтепродукты Petroleum products	0,085	0,079	0,009
БПК <sub>5</sub> / Biochemical oxygen demand	2,89	3,20	5,399
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,79	63,06	63,06
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,12	0,1281	0,22
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,66	0,79	1,27
Сульфиды / Sulfides	0,008	0,008	0,008
CH <sub>2</sub> O	0,148	0,16	0,16
СПАВ / Synthetic surfactants	0,66	0,79	0,78

сточных водах, содержащихся в жидких отходах рассматриваемого завода по действующей методике [11] расчёта  $C_{НДС}$  и по предлагаемой модернизации методики расчёта  $C_{НДС}$ .

Расчёт НДС, как по действующей методике, так и нормативной требует определения кратности общего разбавления сточных вод в водотоке (N). Этот показатель был рассчитан в соответствии с методикой [11]. Получено значение 0,98, что соответствует значению, указанному в проекте НДС для имеющегося одиночного сброса жидких отходов.

В таблице 3 приведены результаты расчёта НДС по предлагаемым этапам методики (НДС<sub>модер.</sub>) в сравнении с действующей методикой (НДС<sub>дейст.</sub>) и фактическими значениями сброса жидких отходов. Исследования жидких отходов предприятия выполнено аккредитованной лабораторией с применением утверждённых методов химического анализа.

Полученные с использованием предлагаемой модернизации методики расчёта НДС результаты предъявляют более жёсткие требования к величине НДС для веществ преимущественно антропогенного проис-

хождения (нефтепродукты). Для некоторых веществ двойного генезиса (сульфаты, фосфаты, БПК<sub>5</sub>, ионы аммония, нитриты) величина НДС, определённая по действующей методике (НДС<sub>дейст.</sub>), получилась меньше, чем величина НДС, рассчитанная по модернизированной методике (НДС<sub>модер.</sub>), причём существенно меньше для фосфатов. Для веществ, содержание которых в р. Волга не достигает ПДК, изменение величины НДС по модернизированной методике (сульфиды, формальдегид, СПАВ, хлориды, нитраты) является незначительным.

### Заключение

Поверхностные водные объекты характеризуются значительной пространственной неоднородностью и природными особенностями формирования состава вод. Способность к разбавлению жидких производственных отходов определяется гидрологическими и гидрохимическими характеристиками водного объекта. Предельно допустимые концентрации некоторых веществ, в том числе двойного генезиса, не могут быть обеспечены в силу природных особенностей водных объектов даже при жёстких методах регулирования антропогенного воздействия. Данные особенности необходимо учитывать при расчёте нормативов допустимого сброса жидких производственных отходов в поверхностные водные объекты. При расчёте действующих НДС в настоящее время учитываются лишь гидрологические критерии кратности разбавления. Нами предложен подход для расчёта НДС веществ, входящих в состав жидких отходов, прежде всего двойного генезиса, для учёта региональных особенностей формирования состава природных вод. Расчёт пороговых концентраций предложено осуществлять на основе анализа массивов данных гидрохимических наблюдений, что позволяет учесть региональные особенности состава природных вод и их способность к разбавлению стоков жидких отходов. С другой стороны, должно обеспечиваться сохранение класса качества воды, поэтому предложен способ корректировки пороговых концентраций по значениям УКИЗВ. Внедрение предложенного развития действующей методики нормирования сбросов жидких отходов позволит: снизить неоправданно высокие затраты на водоочистку; ранжировать проблемы по загрязнению водных объектов компонентами жидких отходов; сформировать научно-обоснованную программу поэтапного

снижения сбросов жидких отходов в пределах речных бассейнов.

*Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-03-2023-032 от 16.01.2023 (номер темы FZSU-2023-0005).*

### Литература

1. Лепихин А.П. Проблемы регулирования антропогенного воздействия на водные объекты // Водное хозяйство России. 2004. № 4. С. 318–345.
2. Строков А.А. Особенности нормирования качества воды при разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 3. С. 105–109.
3. Беспалова К.В. Определение нормативов допустимого сброса веществ двойного генезиса в водные объекты Нижней Волги с учётом их природных особенностей // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2014. № 8 (80). С. 68–74.
4. Ласкорин Б.Н., Лукьяненко В.И. Стратегия и тактика охраны водоёмов от загрязнения // Вестник РАН. 1992. № 11. С. 45–63.
5. Мусихина Т.А. Региональные нормативы содержания химических элементов в поверхностных водах // Экология и промышленность России. 2001. № 5. С. 26–28.
6. Караушев А.В., Шварцман А.Я. Нормирование сбросов сточных вод в реки с учётом их режима // «Качество вод и научные основы их охраны»: Труды V Всесоюз. гидрологического съезда. Т. 5. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 17–28.
7. Гагарина О.В. Проблемы нормативного обеспечения разработки и установления нормативов допустимого воздействия на водные объекты // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. 2010. Выпуск 1. С. 20–26.
8. Селезнёв В.А., Селезнёва А.В., Беспалова К.В. Разработка бассейновых нормативов качества воды (на примере водных объектов нижней Волги) // Водное хозяйство России. 2013. № 2. С. 42–53.
9. Селезнёва А.В. От мониторинга к нормированию антропогенной нагрузки на водные объекты. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2007. 105 с.
10. Селезнёва А.В. Разработка превентивных мер борьбы с «цветением» воды на крупных водохранилищах // Экология и промышленность России. 2010. № 7. С. 38–43.
11. Методика разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей (утверждена Приказом Минприроды России от 29 декабря 2020 года № 1118 с изменениями

на 18 мая 2022 года) [Электронный ресурс] <https://docs.cntd.ru/document/573275596?ysclid=lmprw9mffxx671679246> (Дата обращения: 15. 09.2023).

12. Саакян Ю.З., Григорьев А.В., Кравец Е.А., Рудаков Е.Н., Фаддеев А.М., Шкарупа А.А. Анализ «Методики разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей» в общем контексте водоохранного законодательства // Водоснабжение и санитарная техника. 2020. № 2. С. 25–30.

13. Никаноров А.М., Черногаева Г.М., Беляев С.Д. Фундаментальные и прикладные проблемы качества поверхностных водных ресурсов // VII Всероссийский гидрологический съезд: тезисы пленарных докл. СПб., 2013. С. 43–53.

14. Беляев С.Д. К вопросу о нормировании водопользования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2004. Т. 6. № 5. С. 445–459.

15. Brown S. A note on environmental risk and the rate of discount // Journal of Environmental Economics and Management. 1983. V. 10. P. 282–286.

16. Карадашина Л.Ф., Хохлявин С.А., Сурсыяков В.Н. Опыт управления водными ресурсами в Европейском Союзе и его значение для России // Водохозяйственный комплекс России: проблемы, технологии, менеджмент. 2002. Т. 4. № 5. С. 406–413.

17. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Байбакова Е.В., Валиев В.С. Методология определения региональных пороговых концентраций для расчёта нормативов допустимого сброса жидких производственных отходов в поверхностные воды // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 28–33.

18. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Иванов Д.В., Шагидуллин А.Р., Валиев В.С., Мораиш А.Х. Подходы для установления пороговых концентраций приоритетных загрязняющих веществ в компонентах урбоэкосистемы // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 23–28.

19. Банникова О.А., Бычкова Е.Н. К вопросу об установлении региональных стандартов качества воды // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 54–68.

## References

1. Lepikhin A.P. Problems of regulation of anthropogenic impacts on water bodies // Water economy of Russia. 2004. No. 4. P. 318–345.

2. Stokov A.A. Features of water quality rationing in the development of standards for permissible impact on water bodies // Bulletin RUDN, series Ecology and Life Safety. 2014. No. 3. P. 105–109 (in Russian).

3. Bepalova K.V. Determination of standards for permissible discharge of substances of dual genesis into the water bodies of the Lower Volga, taking into account their natural features // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. 2014. No. 8 (80). P. 68–74 (in Russian).

4. Laskorin B.N., Lukyanenko V.I. Strategy and tactics for protecting water bodies from pollution // Vestnik RAN. 1992. No. 11. P. 45–63 (in Russian).

5. Musikhina T.A. Regional standards for the content of chemical elements in surface waters // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2001. No. 5. P. 26–28 (in Russian).

6. Karashev A.V., Shvartsman A.Ya. Standardization of wastewater discharges into rivers, taking into account their regime // Trudy V Vsesoyuz. gidrologicheskogo sezda “Water quality and scientific basis for their protection”. V. 5. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991. P. 17–28 (in Russian).

7. Gagarina O.V. Problems of regulatory support for the development and establishment of standards for permissible impact on water bodies // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Biologiya. Nauki o Zemle. 2010. V. 1. P. 20–26 (in Russian).

8. Seleznev V.A., Selezneva A.V., Bepalova K.V. Development of basin water quality standards (using the example of water bodies of the Lower Volga) // Vodnoe khozyaystvo Rossii. 2013. No. 2. P. 42–53 (in Russian).

9. Selezneva A.V. From monitoring to standardization of anthropogenic load on water bodies. Samara: Izd-vo SamNTs RAN, 2007. 105 p. (in Russian).

10. Selezneva A.V. Development of preventive measures to combat water blooms in large reservoirs // Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2010. No. 7. P. 38–43 (in Russian).

11. Methodology for developing standards for permissible discharges of pollutants into water bodies for water users (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated December 29, 2020 No 1418 as amended on May 18, 2022) [Internet recourse] <https://docs.cntd.ru/document/573275596?ysclid=lmprw9mffxx671679246> (Accessed: 15. 09.2023) (in Russian).

12. Saakyan Yu.Z., Grigoriev A.V., Kravets E.A., Rudakov E.N., Faddeev A.M., Shkarupa A.A. Analysis of “Methods for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users” in the general context of water protection legislation // Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2020. No. 2. P. 25–30 (in Russian). doi: 10.35776/MNP.2020.02.05

13. Nikanorov A.M., Chernogaeva G.M., Belyaev S.D. Fundamental and applied problems of surface water quality // VII Vseros. Hydrol. Congress: theses of plenary reports. Sankt-Peterburg: Hydrometeoizdat, 2013. P. 43–53 (in Russian).

14. Belyaev S.D. On the issue of rationing water use // Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie. 2004. V. 6. No. 5. P. 445–459 (in Russian).

15. Brown S. A note on environmental risk and the rate of discount // Journal of Environmental Economics and Management. 1983. V. 10. P. 282–286.

16. Karadashina L.F., Khokhlyavin S.A., Sursyakov V.N. Experience of water resources management in the European

Union and its significance for Russia // Russian Water Industry: problems, technologies, management. 2002. V. 4. No. 5. P. 406–413 (in Russian).

17. Tunakova Yu.A., Novikova S.V., Baybakova E.V., Valiev V.S. Methodology for determining regional threshold concentrations for calculating standards for permissible discharge of liquid industrial waste into surface waters // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 28–33 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-028-033

18. Tunakova Y.A., Novikova S.V., Ivanov D.V., Shagidullin A.R., Valiev V.S., Morais A.J. Approaches for establishing threshold concentrations of priority pollutants in urban ecosystem components // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 23–28 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-023-028 2020

19. Bannikova O.A., Bychkova E.N. To the issue of establishing regional water quality standards // Water economy of Russia. 2011. No. 6. P. 54–68 (in Russian).

## Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields as an object of ecological risk

© 2023. A. V. Vasilyev ORCID: 0000-0002-6068-5537

Institute of Ecology of Volga Basing RAS –  
Branch of Samara Federal Research Center of Russian Academy of Science,  
10, Komzina St., Togliatti, Russia, 445003,  
e-mail: avassil62@mail.ru

In this paper peculiarities of negative impact of oil-containing waste to humans and biosphere and approaches to its estimation are considered. For the estimation of ecological risks of negative impact of oil-containing waste in areas of oil and gas fields it is suggested to take into account not only its toxicological and quantitative characteristics, but also the degradation of the territories of fields, potential recultivating capacity of fields, suitability of wastes for utilization etc. Negative ecological impact not only from operation but also from mothballed oil well should be investigated. Results of complex experimental researches of negative impact of oil-containing waste in regions of development and exploitation of oil and gas fields are described. In number of cases increased values of oil containing waste and heavy metals were determined in soil and in water environment. For oil wells of Mogutovskoye field acute toxicity of soil samples near to the wells and excess over maximum permissible concentrations of methane were determined. Results of monitoring of toxicological impact of oil containing waste in areas of different oil fields of Samara region and in oil treatment plants by using of biological testing methods have showed that a number of samples have enlarged toxicity and are causing acute toxic effect to the test-organisms – green algae *Chlorella vulgaris* Beijer and *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson, crustaceans *Daphnia magna* Straus. In number of cases increased values of oil products was observed. Thus, it was determined that negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields is complex in nature and may cause significant ecological risks for air, water and soil. Results of work allow us to carry out more efficient and high quality monitoring of negative impact of oil-containing waste and estimation of ecological risks as well as to develop the measures for reduction of negative impact of oil-containing waste.

**Keywords:** oil-containing waste, negative impact, oil fields, ecological monitoring, estimation, ecological risk.

УДК 504.06+574+663.1

## Комплексный экологический мониторинг негативного воздействия нефтесодержащих отходов в районах нефтяных месторождений как объекта экологического риска

© 2023. А. В. Васильев, д. т. н., зав. лабораторией,

Институт экологии Волжского бассейна РАН – филиал Самарского федерального  
исследовательского центра РАН,  
445003, Россия, г. Тольятти, ул. Комзина, д. 10,  
e-mail: avassil62@mail.ru

В работе рассматриваются проблемы негативного воздействия нефтесодержащих отходов на человека и биосферу и подходы к его оценке. Для оценки экологических рисков негативного воздействия нефтесодержащих отходов в районах нефтегазовых месторождений предложено учитывать не только их токсикологические и количественные характеристики, но также деградацию территорий месторождений, потенциальную рекультивационную способность месторождений, пригодность отходов к утилизации и др. Следует исследовать негативное экологическое воздействие не только от действующих, но и от законсервированных нефтяных скважин. Описаны результаты комплексных экспериментальных исследований негативного воздействия нефтесодержащих отходов в районах разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений. В ряде случаев установлено повышенное содержание нефтепродуктов и тяжёлых металлов в почве и водной среде. Для нефтяных скважин Могутовского месторождения установлены острая токсичность проб почвы вблизи скважин, а также превышение предельно допустимых концентраций по метану. Результаты мониторинга токсикологического воздействия нефтесодержащих отходов в районах различных месторождений Самарской области, а также на нефтеперерабатывающих предприятиях, с использованием методов

биотестирования показали, что ряд проб обладают повышенной токсичностью и оказывают острое токсическое действие на тест-организмы: зелёные водоросли *Chlorella vulgaris* Beijer и *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson, рачков *Daphnia magna* Straus. Таким образом, установлено, что негативное воздействие нефтесодержащих отходов в районах нефтяных месторождений носит комплексный характер и может создавать значительные экологические риски как для воздушной и водной сред, так и для почвы. Результаты работы позволяют осуществлять более эффективный и качественный мониторинг негативного воздействия нефтесодержащих отходов и оценку возникающих при этом экологических рисков, разрабатывать мероприятия по снижению негативного воздействия.

**Ключевые слова:** нефтесодержащие отходы, негативное воздействие, нефтяные месторождения, экологический мониторинг, оценка, экологический риск.

Negative impact of oil containing waste is a serious problem due to the fact that they have a complex negative impact on the soil, air and water medium and pose a great danger as for the humans as for the biosphere in total [1–6].

The main types of oily wastes are oil sludges and drilling wastes formed in the process of oil production, oil emulsions, waste from oil containing wastewater treatment plants, oil sludges from stripping tanks and equipment, formed in the process of oil refinement. Additional ones include the wastes collecting in result of oil spills, e.g. sorbents contaminated with petroleum products. During the development and exploitation of oil and gas fields the oil containing wastes are causing the complex negative impact, including toxicological, radiation, chemical etc.

For the development of the effective methods and solutions to reduce negative impact of oil containing wastes to the biosphere it is necessary to carry out ecological monitoring. Efficient ecological monitoring allows us to ensure the sanitary-epidemiological and ecological well-being of the population in urban territories, to take timely and qualitative measures to reduce the negative impact of pollutions to the biosphere [1, 2, 5]. Results of ecological monitoring allow us not only to get real values of substances, but also to determine the ratio between a certain concentration of a substance which is polluting the environment, and the likelihood of a negative impact on human health, to estimate ecological risks of negative impact to the biosphere.

Analysis of existing methods of ecological monitoring of oil containing wastes to the biosphere is showing that due to the high cost and technological complexity the use of a number of them is limited. They have a number of disadvantages and they cannot provide a complete and qualitative assessment of pollution parameters generated by the oil containing wastes. The methods of ecological monitoring traditionally used at the present time are often not allowing us to determine precisely the degree of ecological danger from the impact

of oil containing waste. These methods do not reflect the level of anthropogenic impact on the population and biogeocenoses, they do not show the reactions of living organisms to this effect, they do not take into account the combined effect of the factors of different nature (physical, chemical, biological) on a person.

The actual task is improving methods and approaches to environmental monitoring of impact of oil containing wastes to biosphere as a source of ecological risk and obtaining new experimental data.

The purpose of the work – to carry out comprehensive environmental monitoring of negative impact of oil containing wastes in areas of development of oil fields and to get new experimental data.

### Materials and methods of research

Selection of the methods of ecological monitoring during the impact of oil containing waste and oil products to biosphere should be made taking into account available sources of pollutions and the kinds of pollutions: chemical, biochemical, microbiological, etc. [2, 6–8]. It should be taken into consideration that for estimation of the state of the objects of biosphere in changing environmental conditions not only quantitative characteristics of pollutions, but also their consequences are becoming important. Minimizing of the cost of technical means it should also be taken into account [1].

Oil containing waste may have high degree of toxicity [3, 4, 8]. One of efficient approaches for the determination of the degree of toxicity of the soil and water objects polluted by the oil containing wastes and by the oil products is using of the methods of biological indication and of biological testing [9–13], giving us an objective integral estimation of the quality of environment and grounds for forecasting the state of ecosystems.

Complex approach in carrying out environmental monitoring of oil containing wastes (combination of methods of biological

indication and of biological testing, methods of quantitative chemical analysis, radiation control etc.) with systematic observation is allowing us to judge not only the quantitative characteristics of pollutions, but also about perspectives of community structure changes, productivity of populations and about the sustainability of ecosystems.

The approach proposed by the author assumes that at the preliminary stage of monitoring it is reasonable to develop a conceptual model of the territory, representing a graphical or descriptive representation of possible relationships between the oil containing waste as sources of environmental pollution and routes of exposure. Then it is necessary to carry out calculating and instrumental evaluation of the parameters of oil-containing waste in the analyzing objects of environment, and also to use the data of previous monitoring researches. It should be noted that for the estimation of negative impact of oil containing wastes it is necessary to carry out researches not only of the waste itself but also the land areas and water objects near to the places of development of oil and gas fields, oil containing wells etc. In particular, the analysis of soil ground samples, bottom sediments, radiation control, measurements of parameters of air environment etc. it should be carried out.

For the estimation of ecological risks of negative impact of oil containing wastes in areas of oil and gas fields it is suggested to take into consideration not only its toxicological and qualitative characteristics, but also degradation of the territory of fields, potential recultivating capacity of oil fields, the ability of waste to phase-disperses concentration, suitability of waste for utilization etc. Negative environmental impacts should be investigated not only from operating oil wells but also from mothballed ones.

When conducting quantitative chemical analysis of oil containing waste on the presence of oil products it is reasonable to use federal environmental regulation (PND F 16.1:2.21-98), for heavy metals – federal environmental regulations (PND F 16.1.40-03 – cadmium, cuprum, lead, zink), FR.1.31.2010.07281 (nickel), federal environmental regulation (PND F 16.1:2.3:2.2:3.57-08 – aluminum). When determining the percentage of components of oil containing wastes it is necessary to determine oil products (federal environmental regulation (PND F 16.1.2:2.2:2.3.3.64-10), humidity (Russian Sate Standard 2477-2014, federal environmental regulation PND F 16.2.2:2.3:3.27-02), ash content (federal environmental regulation

PND F 16.2.2:2.3:3.29-02), the hydrogen index (federal environmental regulation PND F 16.2.2:2.3:3.27-02).

During the estimation of toxic impact of oil containing wastes in soil and in water objects it is reasonable to use green algae *Chlorella vulgaris* Beijer and *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Brébisson, crustaceans *Daphnia magna* Straus [2, 9, 10, 13] (PND F T 14.1:2:4.12-06, 16.1:2:3:3.9-06, FR.139.2007.03222, FR.139.2007.03223 etc.).

## Results and discussion

Complex experimental researches of the negative impact of oil containing wastes to environment were carried out in areas of development and exploitation of oil and gas fields of Samara and Orenburg regions.

In Sergievsk district of Samara region soil samples were analyzed in the area of production wells of Yakushkinskoye field, taken in the different distances from the wells. For production well No. 1027 it was determined increased content of oil products as well as of the cuprum (gross form) and nickel (gross form) inside the boning.

In Zolnoye oil field complex researches of soil and water at the distance up to 200 meters from the Volga river bank were carried out. In the downstream part during visual and smell inspection no traces of petroleum products were found near the shore and on the towpath, including the location of operation of floating crane carrying out soil sampling at the distance approximately 100 meters from the river shore. In the upstream part oil film contamination detected in the area of booms specially installed in 2012 along the water edge. Samples of water, aquatic vegetation, and the ground were taken in area of garden non-profit partnership 7 of the village of Zolnoye. The scheme of sampling sites is shown in Figure.

Film contamination of oil products with the smell of a light fraction of hydrocarbons and the output of oil products from the bottom were detected on a local area of approximate size 50 m along the coast and 5–10 m from the coast. At the same time as outpourings forming an iridescent film in place as well as small outlets of gas jets with an admixture of oil products were observed. In the area of the spill for a long time there was oil preparation station of Zolnenskoye field liquidated in the 1990s, from which the ducker came out through the Volga River towards the village of Zadelnoye. Presently the territory of the in-

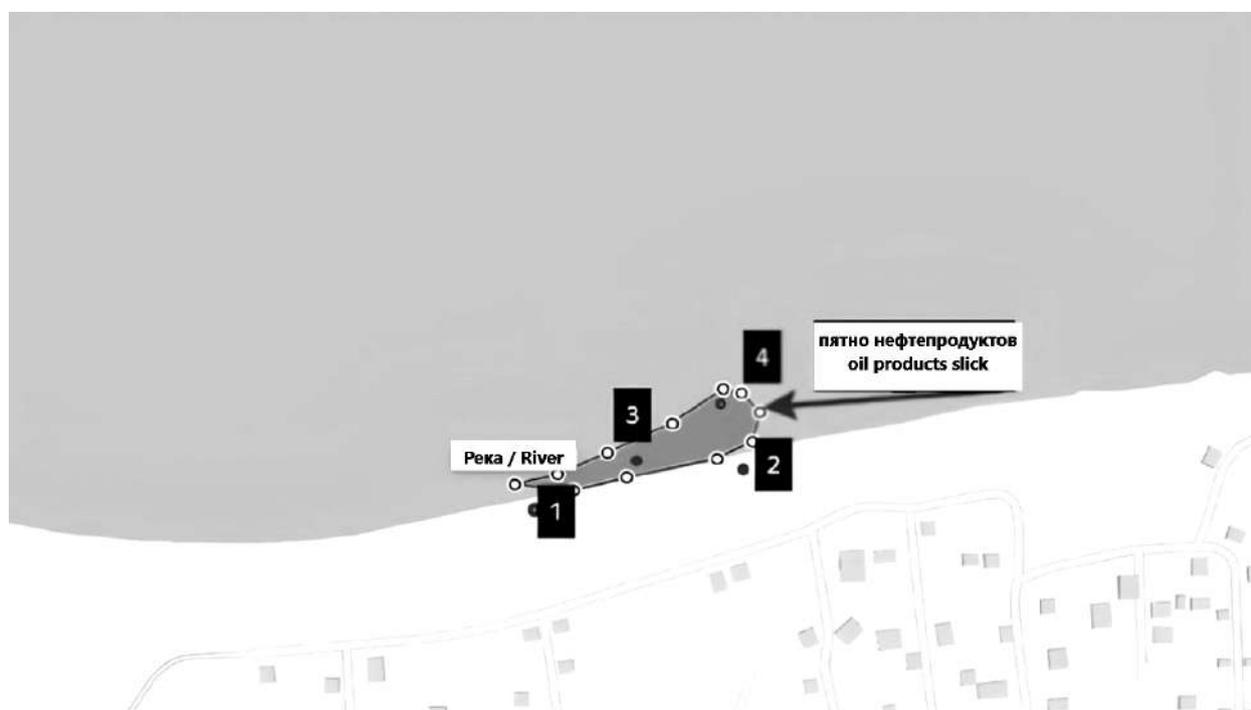


Fig. The scheme of sampling sites in area of the village of Zolnoye of Samara region (explanations in the text)

dustrial zone is built up by a garden partnership. At the territory of garden non-profit partnership in the ravine there were previously cases of oil products emission from the soil ground (e.g. in the year of 2012). Water pollution was noted e.g. in the review of Russian Hydro Meteorological Service for May of the year 2022.

Soil samples were taken on the shore from a depth of 0.4 m along the shore at the distance 2–3 m from the water and along the talweg of the ravine in 50 m from the coastline at a height of about 6 m from the water's edge (points 1 and 2 in Figure). In coastal samples a sharp change in the nature of the soil was detected, passing into the black anaerobic zone with the remains of fuel oil on the buried pebbles and a specific smell of changed oil products (presumably oil sludge). The zone of changes starts from a depth of 0.1–0.2 m without going to the surface and submerges below the water level to an unspecified depth. The soil of the towpath is gravel-pebble-gravelly with the unsorted debris. Samples of water and aquatic vegetation were also taken from the surface in the place of the maximum accumulation of the rainbow film.

By thalweg soil was detected of clearly of man-made origin based on artificially displaced loams and heterogeneous fragments of carbonate rocks lying at the different levels. During visual examination at this site of samples selection no impurities of oil products were detected.

Results of laboratory research of ground samples taken in points 1 and 2 according to the scheme of the measurements in fig.1 are shown in Table 1. Significant content of oil products increasing of the sanitary norms values in probe taken in point 1 was determined. During the analysis of the probe taken in point 2, increased content of oil products was also observed.

The samples of bottom sediments (river bottom) near to the bank on the depth 2.7 m (point 3) and on the depth 7.9 m (point 4) were also analyzed. Results of biological testing of soil probes with using of test-objects algae *S. quadricauda* and of crustacean *D. magna* are showing that the studied samples do not have an acute toxic impact. So, for a sample of bottom sediments taken at the depth of 2.7 m (point 3), by algae a change in the fluorescence level (inhibition) 14% was observed (without diluting the water extract), by daphnia – mortality 0% (without diluting the water extract). Thus, acute toxicity for these samples has not been determined. At the same time, an increased content of the oil products was observed for both samples.

Pollutions of soil and of air, radiological characteristics near to oil pipelines and mothballed oil wells in the area of Mogutovskoye field of Orenburg region were also investigated. Results of laboratory research of soil samples in area of the well No. 107 of Mogutovskoye field of Orenburg region are shown in Table 2. Analysis of results of

Table 1

Results of laboratory research of soil samples near to the river bank in points 1 and 2 in the village of Zolnoye of Samara region in area of garden non-profit partnership 7

Name of the component (indicator), unit of measurement	Result of measurement and attributed measurement error (uncertainty)	
	Point 1	Point 2
Cadmium (gross form), mg/kg	1.1±0.4	0.83±0.33
Cuprum (gross form), mg/kg	9.9±3.0	6.6±2.0
Lead (gross form), mg/kg	b.d.l.	b.d.l.
Zink (gross form), mg/kg	50±18	52±18
Nickel (gross form), mg/kg	12.1±3.1	4.3±1.4
Aluminum (gross form), mg/kg	0.13±0.05	0.47±0.19
Oil products (gross form), mg/kg	6200±1600	300±80

Note to tables 1 and 2: b.d.l. – below detection limit.

Table 2

Results of laboratory researches of soil samples near the well No 107 and at the distance 2.5 m from the well No 107 of Mogutovskoye field of Orenburg region

Name of the component (indicator), unit of measurement	Result of measurement and attributed measurement error (uncertainty)	
	soil sample near the well No. 107	soil sample at the distance 2.5 m from the well No. 107
Cadmium (gross form), mg/kg	0.75±0.30	b.d.l.
Cuprum (gross form), mg/kg	10.8±3.2	17±5
Lead (gross form), mg/kg	b.d.l.	b.d.l.
Zink (gross form), mg/kg	72±25	52±18
Nickel (gross form), mg/kg	b.d.l.	b.d.l.
Aluminum (gross form), mg/kg	b.d.l.	b.d.l.
Oil products (gross form), mg/kg	1150±290	300±75

measurements is showing that near to the well and at the distance 2.5 m from the well there is a significant content of oil products and zink (gross form).

Analyses of samples taken near the well No. 103, and also near to the oil pipeline of the Mogutovskoye field of Orenburg region, are showing the increased content of oil products.

Results of biological testing of soil samples taken near to the wells No. 103 and No. 107 with using of test objects algae *S. quadricauda* and crustacean *D. magna* are showing that the studied samples have an acute toxic effect. For the samples of soil taken near to the well No. 103 by algae a change in the fluorescence level (inhibition) 94% was observed (without diluting the water extract), by daphnia – mortality 100% (without diluting the water extract). For the samples of soil taken near to the well No. 107 by algae a change in the fluorescence level (inhibition) 92% was observed (without diluting the water extract), by daphnia – mortality 100% (without diluting the water extract).

The state of the atmosphere air near to the mothballed wells of the Mogutovskoye oil

field was estimating with using of gas analyzer GANK-4 by methane, carbon monoxide, saturated hydrocarbons and hydrogen sulfides content. At the maximum permissible one-time concentration ( $MPC_{m.s.}$ ) of methane (approximately safe level of exposure) in atmosphere air 50 mg/m<sup>3</sup> in a number of points of measurements exceeds were observed: in the area of well No. 103 the average concentration of methane was measured equal 88.5 mg/m<sup>3</sup>, in the area of well No. 107 the average concentration of methane was measured equal 95.9 mg/m<sup>3</sup>. Thus, almost twice the excess of  $MPC_{m.s.}$  of methane was observed. An insignificant exceeding of maximum permissible concentration for hydrogen sulfide was also found near to the well No. 107. According to other parameters of atmospheric air, no exceeding has been determined.

In results of measurements of gamma-radiation and of volume activity of radon in the air near to the oil field and the mothballed wells of the Mogutovskoye oil field no excess of admissible norms was detected.

Results of monitoring of toxicological impact of oil containing wastes in areas of the

different oil fields of Samara region and also in oil treatment plants with using of the methods of biological testing are showing that a number of samples are having the increased toxicity and are causing acute toxic impact on test-objects *C. vulgaris* and *D. magna*. It was determined that a number of investigated samples of soil are having high toxicity and hyper toxicity. For example, the probes of soil taken near the cisterns on one of the objects were causing the hyper toxic impact to the test object *D. magna* in the range of concentrations 0.011%–1% and 0.12%–10%. 100% mortality of test object was observed within a few minutes-hours after the start of the biological testing at any concentration of the range. Also, the studied samples had a hyper toxic effect on *C. vulgaris*. Results of qualitative chemical analysis of samples, including sludges cleaning of tanks and pipelines from the oil and the oil products are also showing that in number of the cases increased content of oil products and of ash content is observed. Thus, it was determined that oil containing wastes in a number of cases are having acute toxicity and may cause significant negative impact to the human and to the biosphere.

### Conclusion

New approaches to the estimation of negative impact of oil containing wastes to the humans and to the biosphere are suggested. It is necessary to carry out the investigations not only of wastes, but also land territories and water bodies near to the areas of development of oil gas fields, oil-bearing wells etc. In particular, soil samples, bottom sediments should be measured, as well as also radiation control, measurements of parameters of atmosphere air etc. should be carried out. For the estimation of ecological risks of negative impact of oil containing waste in areas of oil and gas fields it is suggested to take into consideration not only its toxicological and qualitative characteristics, but also degradation of the territories of oil fields, potential recultivating capacity of oil fields, the ability of waste to phase-dispersed concentration, suitability of wastes for utilization etc. It is necessary to investigate negative ecological impact not only from operating but also from mothballed oil wells.

Complex experimental researches of negative impact of oil containing wastes in the areas of development and exploitation of oil and gas fields were carried out.

Results of monitoring of toxic impact of oil containing wastes in areas of different oil fields of Samara region, and also in oil refinement enterprises with using of the methods of biological testing are showing that the number of the samples are having increased toxicity and have an acute toxic impact. Results of quantitative chemical analysis of samples, including sludges cleaning of tanks and pipelines from the oil and oil products, are also showing that, in some cases, there is an increased content of oil products and the ash content.

Thus, it was established that negative impact of oil containing wastes in the areas of oil fields it is complex in nature and may cause significant ecological risks as for air and water environment, and for the soil.

Results of this work are allowing us to carry out more efficient and quality monitoring of negative impact of oil containing waste to biosphere and the estimation of emerging ecological risks, to develop the measures to reduce negative impact.

*This work was done in frameworks of the state task of Ministry of science and higher education of Russian Federation to the institutions of science, topic No. 1021060107178-2-1.5.8.*

### Литература

1. Ашихмина Т.Я., Сюткин В.М. Комплексный экологический мониторинг регионов. Киров: Изд-во ВятГГУ, 1997. 286 с.
2. Васильев А.В. Особенности мониторинга негативного воздействия нефтесодержащих отходов на биосферу // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. Т. 24. № 2. С. 113–120.
3. Васильев А.В., Тупицына О.В. Экологическое воздействие буровых шламов и подходы к их переработке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 5. С. 308–313.
4. Ермаков В.В., Суханосова А.Н., Быков Д.Е., Пирожков Д.А. Определение класса опасности нефтешламов // Экология и промышленность России. 2008. № 7. С. 14–16.
5. Карташев А.Г., Смолина Т.В. Влияние нефтезагрязнений на почвенных беспозвоночных животных. Томск: В-Спектр, 2011. 146 с.
6. Зинченко Т.Д., Выхристюк Л.А., Шитиков В.К. Методологический подход к оценке экологического состояния речных систем по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Известия Самарского научного центра РАН. 2000. Т. 2. № 2. С. 233–243.
7. Кутявина Т.И., Ашихмина Т.Я. Современное состояние и проблемы мониторинга поверхностных водных

объектов России (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 13–21.

8. Олькова А.С., Березин Г.И., Ашихмина Т.Я. Оценка состояния почв городских территорий химическими и эколого-токсикологическими методами // Поволжский экологический журнал. 2016. № 4. С. 411–423.

9. Ашихмина Т.Я., Алалыкина Н.М., Кантор Г.Я., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю. Биоиндикация и биотестирование методы познания экологического состояния окружающей среды. Киров: Изд-во ВятГГУ, 2005. 52 с.

10. Васильев А.В. Подходы к определению токсичности нефтесодержащих отходов с использованием биоиндикации и биотестирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2022. Т. 24. № 5. С. 36–43.

11. Олькова А.С., Ашихмина Т.Я. Факторы получения репрезентативных результатов биотестирования водных сред (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 22–30.

12. Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Оценка качества биоиндикаторов // Биоиндикация экологического состояния равнинных рек. М.: Наука, 2007. С. 370–380.

13. Vasilyev A.V. Experience, results and problems of ecological monitoring of oil containing waste // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference “Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development”. Saint-Petersburg: edition of Saint-Petersburg State Electrical Technical University “LETI”, 2018. P. 82–85.

## References

1. Ashikhmina T.Ya., Sutkin V.M. Complex ecological monitoring of regions. Киров: Publishing house of VyatGGU, 1997. 286 p. (in Russian).

2. Vasilyev A.V. Peculiarities of monitoring of negative impact of oil-containing waste to the biosphere // The Bulletin of Samara Scientific Center of Russian Academy of Science. 2022. V. 24. No. 2. P. 113–120 (in Russian). doi: 10.37313/1990-5378-2022-24-2-113-120

3. Vasilyev A.V., Tupitsina O.V. Ecological impact of drilling sludges and approaches to it treatment // The Bulletin of Samara Scientific Center of Russian Academy of Science. 2014. V. 16. No. 5. P. 308–313 (in Russian).

4. Ermakov V.V., Sukhonosova A.N., Bykov D.E., Pirozhkov D.A. Determination of oil sludges hazard class // Ecology and Industry of Russia. 2008. V. 7. P. 14–17 (in Russian).

5. Kartashev A.G., Smolina T.V. Influence of oil pollutions to the soil invertebrates. Tomsk: V-Spektr, 2011. 146 p. (in Russian).

6. Zinchenko T.D., Vykhistjuk L.A., Shitikov V.K. Methodological approach to estimation of ecological state of river systems according to hydrochemical and hydrobiological indicators // The Bulletin of Samara Scientific Center of Russian Academy of Science. 2000. V. 2. No. 2. P. 233–243 (in Russian).

7. Kutuyavina T.I., Ashikhmina T.Ya. Current state and problems of monitoring of surface water bodies in Russia (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 13–21. doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-013-021

8. Olkova A.S., Berezin G.I., Ashikhmina T.Ya. Estimation of state of soils of town territories by chemical and ecological-toxicological methods // Povolzhsky Ecological Journal. 2016. No. 4. P. 411–423 (in Russian). doi: 10.18500/1684-7318-2016-4-411-423

9. Ashikhmina T.Ya., Alalykina N.M., Kantor G.Ya., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.Yu. Biological indication and biological testing methods of cognition of ecological state of environment. Киров: Publishing house of VyatGGU, 2005. 52 p. (in Russian).

10. Vasilyev A.V. Approaches to determination of toxicity of oil containing waste by using of biological indication and biological testing // The Bulletin of Samara Scientific Center of Russian Academy of Science. 2022. V. 24. No. 5. P. 36–43 (in Russian). doi: 10.37313/1990-5378-2022-24-5-36-43

11. Olkova A.S., Ashikhmina T.Ya. Factors of obtaining of representative results of bioassay of aquatic environments (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 22–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-022-030

12. Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. Estimation of the quality of biological indicators. Biological indication of ecological state of the plane rivers. Moskva: Science, 2007. P. 370–380 (in Russian).

13. Vasilyev A.V. Experience, results and problems of ecological monitoring of oil containing waste // Proceedings of the 2018 IEEE International Conference “Management of Municipal Waste as an Important Factor of Sustainable Urban Development”. Saint-Petersburg: edition of Saint-Petersburg State Electrical Technical University “LETI”, 2018. P. 82–85. doi: 10.1109/WASTE.2018.8554175

## Термическая утилизация отработанных масел

© 2023. В. В. Семёнов<sup>1</sup>, д. т. н., профессор, В. И. Жданов<sup>1</sup>, к. т. н., доцент,  
И. А. Синюков<sup>1</sup>, магистрант, М. В. Графкина<sup>2</sup>, д. т. н., профессор,

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
125993, Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4,

<sup>2</sup>Московский политехнический университет,  
107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семёновская, д. 38,  
e-mail: vasily\_semenov@mail.ru

Загрязнение окружающей среды нефтепродуктами является серьёзной экологической проблемой. Существует несколько способов утилизации отработанных масел: регенерация, захоронение и сжигание. Сжигание отработанных масел широко распространено как в России, так и за рубежом. Одним из существенных недостатков метода является поступление в атмосферу вредных веществ. Представлены результаты исследований по разработке более совершенной установки термической утилизации отработанных масел, обеспечивающей полноту сгорания и сокращение вредных выбросов. Установка для термической утилизации отработанных масел состоит из печи и эмульсионной форсунки.

Печь из топочной камеры и камеры дожигания дымового газа обеспечивает двухзонное, двухстадийное горение масла. В топочной камере происходит сжигание масла (1-ая зона горения с  $t \approx 600-700$  °C). Затем дымовой газ поступает в камеру дожигания, где происходит полное его сгорание за счёт подвода дополнительного воздуха (2-ая зона горения с  $t \approx 1200-1300$  °C), благодаря повышению температуры токсичные вещества, содержащиеся в дыме, превращаются в безвредные за счёт полного их окисления.

Эмульсионная форсунка состоит из пересекающихся канавок, которые при подаче в неё воздуха и нагретого масла обеспечивают мелкодисперсное распыление масла путём образования во встречных канавках газожидкостных вихрей. С использованием программы ANSYS проведён расчёт угла факела эмульсионной форсунки. Установлено, что для изменения дальности факела распыления и применения эмульсионных форсунок в печах разного объёма и мощности необходимо менять угол направления шнека.

Данное исследование способствует развитию отрасли переработки отходов производства и потребления. Предлагаемое решение позволяет применять установку не только в промышленных центрах, где накапливаются значительные объёмы отработанных масел, но и в малонаселённых пунктах, а также обеспечивает полноту сгорания нефтеотходов и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** термическая утилизация, отработанные масла, печь с двухфазным горением, топочная камера, камера дожигания, эмульсионная форсунка, факел распыления.

## Thermal disposal of waste oils

© 2023. V. V. Semenov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0007-7651-9377, V. I. Zhdanov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0002-7949-0147,  
I. A. Sinyukov<sup>1</sup> ORCID: 0009-0008-6130-2092, M. V. Grafkina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-7168-5228\*

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),  
4, Volokolamsk highway, Moscow, Russia, 125993,

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University,  
38, Bolshaya Semyonovskaya St., Moscow, Russia, 107023,  
e-mail: vasily\_semenov@mail.ru

Pollution of the environment with petroleum products is a serious environmental problem. There are several ways to dispose of used oils: regeneration, burial and incineration. The burning of waste oils is widespread both in Russia and abroad. One of the significant disadvantages of the method is the entry of harmful substances into the atmosphere. The results of research on the development of a more advanced installation of thermal utilization of waste oils, ensuring the completeness of combustion and reduction of harmful emissions, are presented. The unit for thermal disposal of waste oils consists of a furnace and an emulsion nozzle.

The furnace from the furnace chamber and the afterburning chamber of the flue gas provides two-zone, two-stage oil gorenje. Oil is burned in the combustion chamber (1st gorenje zone with  $t \approx 600-700$  °C). Then the smoke enters the afterburning chamber, where it is completely burned due to the supply of additional air (2nd gorenje zone with  $t \approx 1200-1300$  °C), due to the increase in temperature, toxic substances contained in the smoke are transformed into harmless due to their complete oxidation.

The emulsion nozzle consists of intersecting grooves, which, when air and heated oil are fed into it, provide finely dispersed oil spraying by forming gas-liquid vortices in the oncoming grooves. Using the ANSYS program, the calculation of the flame angle of the emulsion nozzle was carried out. It is established that to change the range of the spraying torch and the use of emulsion nozzles in furnaces of different volume and power, it is necessary to change the angle of the screw direction.

This research contributes to the development of the industry of processing of production and consumption waste. The proposed solution allows the installation to be used not only in industrial centers where significant volumes of waste oils accumulate, but also in sparsely populated areas, and also ensures the completeness of combustion of oil waste and reduces the negative impact on the environment.

**Keywords:** thermal utilization, waste oils, two-phase gorenje, furnace chamber, afterburning chamber, emulsion nozzle, spray torch.

Загрязнение окружающей среды нефтепродуктами, в том числе и отработанными маслами (ОМ), является серьёзной экологической проблемой и приводит к морфологическим и структурным изменениям почвы и нарушению экологического баланса в наземных биомах [1, 2]. Вместе с ОМ в почву попадают и тяжёлые металлы, что повышает риски для здоровья человека [3]. По некоторым оценкам в литосферу и гидросферу сбрасывается до 84% всех ОМ [4].

В настоящее время наиболее распространены следующие методы утилизации ОМ: захоронение, регенерация, сжигание.

Захоронение ОМ не следует рассматривать как способ утилизации, поскольку это скорее откладывание решения проблемы загрязнения окружающей среды на некоторый отдалённый период.

Наиболее широко в России и за рубежом применяются методы регенерации (восстановления) или сжигания ОМ [4, 5]. Опубликованы исследования, представляющие преимущества и недостатки данных методов [6–8]. В первом случае при обработке ОМ удаляются примеси и получают качественные масла, которые могут быть добавлены в технологии создания новых смазочных масел.

Термическая утилизация промышленных и коммунальных отходов – широко распространённый метод по борьбе с отходами и загрязнением окружающей среды [9, 10]. Среди главных достоинств термической утилизации ОМ следует отметить возможность утилизировать их большие объёмы. Также в процессе сжигания производится полезная тепловая энергия, которая может быть использована для отопления помещений.

При сжигании ОМ в котлах или печах в атмосферу поступают вредные вещества, такие, как высокодисперсная пыль, состоящая из минеральных частиц и несгоревших остатков органических веществ; вредные газы, представляющие собой водяной пар, оксиды

азота, диоксид углерода ( $\text{CO}_2$ ), соединения тяжёлых металлов, а также продукты неполного сгорания масла (полиароматические и другие углеводороды), концентрации которых могут превышать ПДК. В среднем при сжигании 1 т отработанного масла в атмосферу выбрасывается около 7 тыс. м<sup>3</sup> вредных газов и золы.

Таким образом, проблема снижения загрязнения атмосферы при термической утилизации ОМ является весьма актуальной задачей.

Цель исследования – создание установки для термической утилизации ОМ, обеспечивающей полноту сгорания ОМ и снижение негативного воздействия на атмосферу. В ходе исследования решались следующие задачи: разработка технологической схемы установки; исследование и разработка газожидкостной эмульсионной форсунки; расчёт угла факела эмульсионной форсунки.

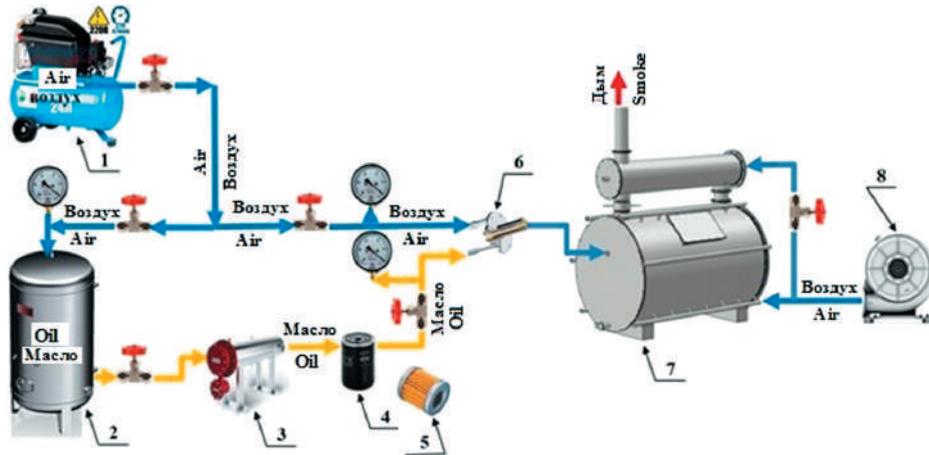
### Объекты и методы исследования

Предлагаемая установка для термической утилизации ОМ обеспечивает полноту сгорания ОМ и снижение вредных выбросов в атмосферу.

На рисунке 1 (см. цв. вкладку I) представлена технологическая схема термической утилизации отработанного масла. Перед сжиганием ОМ в качестве предварительной подготовки применяется его нагрев до жидкого текучего состояния в теплообменнике (3).

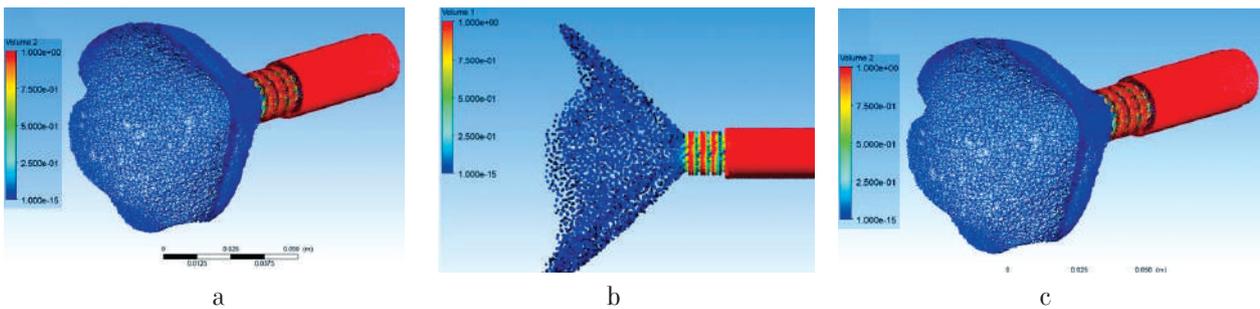
Масло (2), нагретое до жидкого текучего состояния, и воздух (1) подаются в эмульсионную форсунку (6). Масло также проходит предварительную очистку на фильтре (4). С помощью вентилятора (8) воздух подаётся в печь (7) для поддержания процесса горения и охлаждения стенок печи.

Как известно, для полного сгорания каждого вида горючего требуется определённый объём окислителя, соотношение которых на-

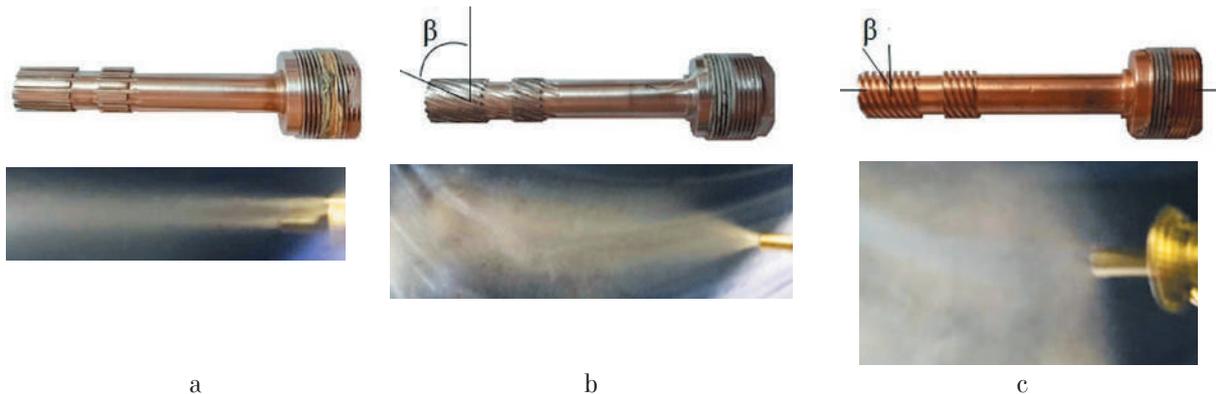


**Рис. 1.** Технологическая схема установки для термической утилизации отработанного масла, где: 1 – воздушный компрессор, 2 – бак для хранения масла, 3 – теплообменник, 4 – масляный фильтр, 5 – сменный картридж, 6 – эмульсионная форсунка, 7 – печь, 8 – вентилятор

**Fig. 1.** Technological scheme of the installation for thermal disposal of waste oil, where: 1 – air compressor, 2 – oil storage tank, 3 – heat exchanger, 4 – oil filter, 5 – replaceable cartridge, 6 – emulsion nozzle, 7 – furnace, 8 – fan



**Рис. 3.** Результаты расчётов факела: а) факел распыла под углом 30°; б) факел распыла под углом 60°; в) факел распыла под углом 60° (повёрнут)  
**Fig. 3.** The results of calculations of the torch: а) the spray torch at an angle of 30°; б) spray torch at an angle of 60°; в) spray torch at an angle of 60° (rotated)



**Рис. 4.** Эмульсионные форсунки и факелы распыла: а) буртик эмульсионной форсунки с продольными канавками и её факел распыла; б) эмульсионная форсунка – канавки выполнены в виде шнеков под углом 60° и её факел распыла; в) эмульсионная форсунка – канавки выполнены в виде шнеков под углом 30° и её факел распыла / **Fig. 4.** Emulsion nozzles and spray torches: а) the collar of the emulsion nozzle with longitudinal grooves and its spray torch; б) emulsion nozzle – grooves are made in the form of augers at an angle of 60° and its spray torch; в) the emulsion nozzle – grooves are made in the form of augers at an angle of 30° and its spray torch

зывается стехиометрическим. Так как через эмульсионную форсунку подаётся то количество воздуха, которое необходимо только для достижения мелко дисперсного распыления жидкого топлива, то в топочную камеру печи должен подаваться воздух (8) в соответствии со стехиометрическим соотношением для полного сгорания в печи горючей смеси, которое необходимо для утилизации токсичных веществ, содержащихся в дымовых газах, путём их полного окисления.

Однако, в связи с тем, что печь состоит из двух камер сгорания, то в топочную камеру должна подаваться обогащённая горючая смесь с тем, чтобы в камере дожигания соблюдалось стехиометрическое соотношение компонентов топлива, то есть в камере дожигания будет происходить досжигание недосгоревшего топлива.

Таким образом, с целью обеспечения полноты сгорания жидкого топлива и полной утилизации токсичных веществ было принято решение организовать в печи двухзонное, двухстадийное горение за счёт установки камеры дожигания.

**Печь с двухзонным горением.** Печь для термической утилизации ОМ состоит из топочной камеры и камеры дожигания дымового газа, благодаря чему в печи осуществляется двухзонное, двухстадийное горение масла. В топочной камере при температуре 600–700 °С происходит сжигание масла (1-ая зона горения), а в камере дожигания обеспечивается дожигание недосгоревшей части масла, содержащейся в дымовом газе, за счёт повышения температуры до 1200–1300 °С, которое достигается путём подвода в камеру дожигания дополнительного воздуха (2-ая зона горения) [11, 12].

**Эмульсионная форсунка.** Все центробежные форсунки имеют цилиндрическую камеру, в которой происходит закручивание потока жидкости. Жидкость попадает в цилиндрическую камеру по каналам, образованным тангенциально в её стенке, в результате чего внутри камеры получается вращательное движение [11]. Далее жидкость, вращаясь внутри камеры закручивания, истекает через сопло форсунки под заданным углом факела. При этом за пределами форсунки жидкость распадается за счёт центробежной силы на мелкие капли.

При утилизации ОМ необходимо учитывать следующие условия:

1. ОМ – это низкокалорийное топливо, которое горит коптящим пламенем с образованием высокой дымности.

2. Компоненты топливной смеси обладают довольно высокой вязкостью.

Исходя из этого необходимо спроектировать двухкомпонентную форсунку, которая будет обладать большим корневым углом, обеспечивающим мелкодисперсное и равномерное распыление.

Полнота сгорания топлива зависит также от того, как приготовлена горючая смесь, то есть от мелкодисперсности распыления жидкого топлива.

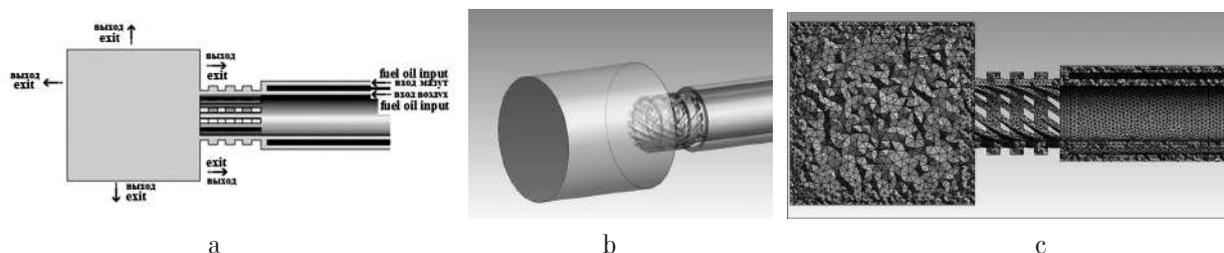
Для мелкодисперсности распыления жидкого топлива (ОМ) предложена эмульсионная форсунка (рис. 2), обеспечивающая необходимое качество [12].

Эмульсионная форсунка представляет собой газожидкостную форсунку, состоящую из двух соосно установленных друг в друга цилиндров (рис. 2). У обоих цилиндров имеются на концах цилиндрические буртики, на которых выполнены прямоугольные канавки. При этом у внешнего цилиндра прямоугольные канавки имеют поперечную форму с внутренней его стороны, а у внутреннего – с наружной его стороны образованы либо по всему его периметру продольные прямоугольные канавки, либо в виде шнека с винтовым направлением закрутки прямоугольных канавок, вследствие чего при их сочленении они образуют эмульсионную форсунку с пересекающимися канавками.

**Расчёт угла факела эмульсионной форсунки.** С целью определения угла распыла двухфазной смеси (масло + воздух) и структуры их смешения между собой внутри эмульсионной форсунки были проведены вычислительные исследования её характеристик с привлечением программы ANSYS, в которой в качестве модельного сочетания компонентов топлива использовалась пара «солярка + воздух». Методика расчёта соответствует [13].

Геометрия объекта создавалась в CAD-программе «SolidWorks». Модель выполнялась для частного расчёта и потому включает только конечную часть с зонами смешения и выходной частью для оценки факела распыла.

Сетка строится в приложении пакета программы CFX-Mesh. Решение любых гидродинамических задач, будь то задачи о ламинарном или турбулентном течениях, требуют значительных вычислительных ресурсов. Как правило, моделирование проводится на относительно плотных расчётных сетках и требует решения уравнений для многих переменных. Поэтому желательно использовать как можно более простую сетку (CFX-Mesh), которая, тем



**Рис. 2.** Модели для расчёта: а) модель эмульсионной форсунки; б) канавки в виде шнека 30°; в) расчётная сетка для форсунки со шнеком  
**Fig. 2.** Models for calculation: a) model of an emulsion nozzle; b) grooves in the form of a screw 30°; c) calculation grid for a nozzle with a screw

не менее, сохраняет все детали моделируемого течения.

Расчёты проводили с использованием модели турбулентности – SST, которая представляет собой комбинацию k-ε и k-ω моделей турбулентности. Для расчёта течения в свободном потоке используются уравнения k-ε модели, а в области вблизи стенок — уравнения k-ω модели. В данной задаче расчёт сошёлся на 371 итерации после 8 часов расчёта с параметрами сходимости по невязкам 0,000001 и схождению балансов 0,01. Результаты расчётов обрабатываются и визуализируются.

Исходные данные для расчёта:

плотность воздуха –  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ;  
 молярная масса –  $\mu = 28,96 \text{ г/моль}$ ;  
 плотность дизтоплива –  $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ ;  
 молярная масса –  $\mu = 167 \text{ г/моль}$ .

Граничные условия на входе:  
 скорость подачи воздуха – 5 м/с;  
 скорость подачи дизтоплива – 5 м/с.

Граничные условия на выходе:  
 среднее выходное давление – 0,1 МПа.

Шнековые каналы на входе в камеру закручивания форсунки в количестве 4 шт. были выполнены с сечением квадратной формы со сторонами в 1,5 мм. Общая площадь каналов  $F_{\text{вх}} = 9 \text{ мм}^2$ .

На рисунке 2а приведена модель эмульсионной форсунки (продольный разрез). На рисунке 2б представлена эмульсионная форсунка, в которой у внутреннего цилиндра на буртике с наружной его стороны имеются прямоугольные канавки в виде шнека с винтовым направлением закрутки под углом 30°.

Расчётная сетка для эмульсионной форсунки с канавками в виде шнеков состояла из 288500 элементов. Она представлена на рисунке 2с.

На рисунке 3 (см. цв. вкладку I) представлены результаты расчётов факела распыления дизтоплива путём смешивания с воздухом

при их подаче в эмульсионную форсунку. Видно, что факел распыления дизтоплива составляет 30 и 60°.

### Результаты и обсуждение

По результатам расчёта была изготовлена и испытана на стенде газожидкостная эмульсионная форсунка. Эксперимент направлен на сравнение работы эмульсионной форсунки при разных формах проточных каналов.

Для экспериментального исследования углов факела распыления жидкости была изготовлена эмульсионная форсунка с тремя формами внутренних канавок.

Первый эксперимент проводился с эмульсионной форсункой, внешний буртик которой был выполнен в виде продольных канавок в количестве 12 штук, имеющих квадратную форму в сечении и размером 1,5 мм × 1,5 мм. Результаты эксперимента представлены на рисунке 4а (см. цв. вкладку I).

Как видно из рисунка 4а (см. цв. вкладку I), факел распыла такой форсунки обладает высокой дальностью, но при этом угол распыления небольшой и неравномерный, вследствие чего не обеспечивается полнота сгорания горючей смеси, располагающейся в объёме по краям печи.

Второй эксперимент проводился с форсункой, буртик которой выполнен в виде шнека с углом  $\beta = 60^\circ$ . Результаты представлены на рисунке 4б (см. цв. вкладку I). Количество канавок – 12 штук, канавки имеют квадратную форму в сечении, размером 1,5 мм × 1,5 мм.

Как видно из рисунка 4б, при такой конструкции эмульсионной форсунки факел распыления обладает высокой мелкостью и дисперсностью, равномерностью и достаточной дальностью.

Третий эксперимент проводился с форсункой, буртик которой выполнен в виде шне-

ка с углом  $\beta = 30^\circ$  (рис. 4с, см. цв. вкладку I). Количество каналов составляет 5 штук, имеют квадратную форму в сечении, размером  $1,5 \text{ мм} \times 1,5 \text{ мм}$ .

Из рисунка 4с видно, что форсунка обладает максимально широким углом распыла. При этом наблюдается низкая дальнобойность. Газожидкостная пелена располагается в непосредственной близости возле форсунки. Факел имеет профиль полого конуса. Такой тип шнека подходит для распыления топливной смеси в печах маленького размера, где нет необходимости в дальнобойности.

Таким образом, в зависимости от типа и размера печи в эмульсионной форсунке, угол установки шнеков можно менять. Так, для более компактных печей подойдёт форсунка с углом наклона шнеков  $\beta = 30^\circ$ , она обеспечит высокую мелкодисперсность и небольшую дальнобойность. Для печи среднего размера подойдёт форсунка с углом наклона шнеков  $\beta = 60^\circ$ , а для печи с большими размерами – форсунка с продольными канавками, обеспечивающая большую дальнобойность.

Данное исследование способствует реализации задач, содержащихся в Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года, утверждённых распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р, а также соответствует современным решениям по переработке отходов [14].

Предложенная установка для термической утилизации отработанного масла при использовании различных видов эмульсионных форсунок (эмульсионная форсунка с продольными канавками, эмульсионные форсунки с канавками, выполненными в виде шнеков под углами  $60^\circ$  или  $30^\circ$ ) позволяет вести утилизацию ОМ не только в промышленных центрах, где накапливаются значительные объёмы ОМ, но и на предприятиях в малонаселённых пунктах России, решая таким образом актуальные экологические проблемы утилизации ОМ и снижения негативного техногенного воздействия на атмосферу.

### Выводы

С целью термической утилизации ОМ и снижения негативного воздействия на атмосферу создана установка, состоящая из двухзонной печи, представляющей собой топочную камеру и камеру дожигания, и из

эмульсионной форсунки с пересекающимися канавками.

Показано, что в топочной камере печи происходит сжигание масла при температуре  $t \approx 600\text{--}700^\circ\text{C}$  (1-ая зона горения), а в камере дожигания – полное сгорание дымового газа при температуре  $t \approx 1200\text{--}1300^\circ\text{C}$ , которая достигается за счёт подвода дополнительного воздуха (2-ая зона горения), благодаря чему токсичные вещества, содержащиеся в дымовом газе, превращаются в безвредные за счёт полного их окисления.

Экспериментально определены факелы распыления различных эмульсионных форсунок, которые позволяют использовать их в печах разного объёма и мощности, что позволяет использовать разработанную установку на предприятиях в малонаселённых пунктах России по утилизации ОМ и снижению тем самым негативного техногенного воздействия на атмосферу.

### Литература

1. Лямзин В.И., Бухарина И.Л., Здобяхина О.В., Исупова А.А. Влияние высших растений в консорциуме с микроорганизмами на агрохимические показатели при биоремедиации нефтезагрязнённых земель // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 166–171.
2. Куликова О.А., Терехова В.А., Маслова Е.А., Нишкевич Ю.А., Кыдралиева К.А. Экоотоксикологические характеристики нефтезагрязнённых грунтов (шламов) после их реагентной обработки // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 120–126.
3. Grafkina M.V., Pitryuk A.V. Analysis and evaluation of the database on soil contamination of the Moscow Region with heavy metals // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 723. No. 4. Article No. 042016.
4. Зачиняев Я.В., Иванюк С.В., Титова Т.С. Критерии оценки воздействия отработанных масел на окружающую природную среду. Обзор технологий регенерации отработанных масел // NovaInfo. 2011. № 3 [Электронный ресурс] <https://novainfo.ru/article/224> (Дата обращения: 29.09.2023).
5. Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils. Final report. December 2001 [Электронный ресурс] [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste\\_oil.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste_oil.pdf) (Дата обращения: 29.09.2023).
6. Hsu Y.-L., Liu C.-C. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology // Environmental Monitoring and Assessment. 2011. V. 176. P. 197–212.
7. Лытов В.М., Комков В.И. Разработка технологии утилизации отработанных моторных масел, образу-

щихся на территории г. Москвы, методом сжигания // *Международный студенческий научный вестник*. 2017. № 4-5 [Электронный ресурс] <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17491> (Дата обращения: 30.09.2023).

8. Камбулова Е.А., Попов В.Г. Переработка отработанных нефтепродуктов с получением вторичных материальных ресурсов // *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2019. № 2 [Электронный ресурс] <https://resources.today/PDF/04ECOR219> (Дата обращения: 30.09.2023).

9. Nixon J.D., Wright D.G., Day P.K., Ghosh S.K., Davies P.A. A comparative assessment of waste incinerator in the UK // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 2234–2244.

10. Adrados A., De Marco I., Lopez-Urionabarrenechea A., Caballero B.M., Laresgoiti M.F. Pyrolysis behavior of different type of materials contained in the rejects of packaging waste sorting plants // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 52–59.

11. Семёнов В.В., Жданов В.И., Веретенников И.Ю., Хиль А.Ю. Способ утилизации мусорных свалок в малонаселённых пунктах России // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 3. С. 4–9.

12. Семёнов В.В., Жданов В.И. Устройство для термической утилизации водного раствора токсичных веществ // Патент на изобретение RU. № 2789002. 2023. Дата публикации: 26.01.2023 Бюлл. № 3.

13. Курпатенков В.Д., Кесаев Х.В. Расчёт форсунок двигателя. М.: МАИ, 1987. 52 с.

14. Корольков М.В., Мажуга А.Г. Основы государственной политики Российской Федерации по созданию новой отрасли переработки промышленных отходов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2020. № 4. С. 6–12.

## References

1. Lyamzin V.I., Bukharina I.L., Zdobychkina O.V., Isupova A.A. Influence of higher plants in a consortium with microorganisms on agrochemical parameters during bioremediation of oil-contaminated lands // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 166–171 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-166-171

2. Kulikova O.A., Terekhova V.A., Maslova E.A., Nishkevich Yu.A., Kydralievа K.A. Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludge) after their reagent treatment // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 120–126 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-120-126

3. Grafkina M.V., Pitryuk A.V. Analysis and evaluation of the database on soil contamination of the Moscow Region with heavy metals // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. No. 4. P. 042016. doi: 10.1088/1755-1315/723/4/042016

4. Zachinyaev Ya.V., Ivanyuk S.V., Titova T.S. Criteria for assessing the impact of waste oils on the environment. Review of waste oil regeneration technologies // *NovaInfo*. 2011. No. 3 [Internet recourse] <https://novainfo.ru/article/224> (Accessed: 29.09.2023) (in Russian).

5. Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils. Final report. December 2001 [Internet recourse] [https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste\\_oil.pdf](https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/oil/waste_oil.pdf) (Accessed: 29.09.2023)

6. Hsu Y.-L., Liu C.-C. Evaluation and selection of regeneration of waste lubricating oil technology // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011. V. 176. P. 197–212. doi: 10.1007/s10661-010-1576-3

7. Lykov V.M., Komkov V.I. Development of technology for utilization of used motor oils formed on the territory of Moscow by incineration // *International Student Scientific Bulletin*. 2017. No. 4-5 [Internet recourse] <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=17491> (Accessed: 30.09.2023) (in Russian).

8. Kambulova E.A., Popov V.G. Recycling of waste materials using secondary mathematical resources // *Waste and resources*. 2019. No. 2 [Internet recourse] <https://resources.today/PDF/04ECOR219.pdf> (Accessed: 30.09.2023) (in Russian). doi: 10.15862/04ECOR219

9. Nixon J.D., Wright D.G., Day P.K., Ghosh S.K., Davies P.A. A comparative assessment of waste incinerator in the UK // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 2234–2244

10. Adrados A., De Marco I., Lopez-Urionabarrenechea A., Caballero B.M., Laresgoiti M.F. Pyrolysis behavior of different type of materials contained in the rejects of packaging waste sorting plants // *Waste Management*. 2013. V. 33. P. 52–59. doi: 10.1016/j.wasman.2012.09.016

11. Semenov V.V., Zhdanov V.I., Veretennikov I.Yu., Khil A.Yu. A method of recycling landfills in sparsely populated areas of Russia // *Ecology and Industry of Russia*. 2021. V. 25. No. 3. P. 4–9 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-3-4-9

12. Semenov V.V., Zhdanov V.I. Device for thermal utilization of an aqueous solution of toxic substances // Patent for invention RU. No. 2789002. 2023. Date of publication: 26.01.2023 Byul. No. 3 (in Russian).

13. Kurpatenkov V.D., Kesaev H.V. Calculation of engine injectors. Moskva: MAI, 1987. 52 p. (in Russian).

14. Korolkov M.V., Majuga A.G. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation on the creation of a new branch of industrial waste processing // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-006-012

## Комплексные исследования содержания биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов, образующихся при длительном хранении

© 2023. Т. И. Ширшова, к. х. н., в. н. с.,  
И. В. Бешлей, к. б. н., н. с.,  
К. Г. Уфимцев, 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: shirshova@ib.komisc.ru

Продолжено исследование содержания биологически активных веществ в образцах продуктов деструкции кородревесных отходов (КДО), взятых на глубине от 1 до 27 м короотвала ОАО «Сыктывкарский ЛДК». Показано, что содержание веществ, растворимых в гексане, составляет от 0,78 до 1,89% сухой массы КДО. Минимальное содержание обнаружено в первой (0,24%) и последней пробах (0,21%) на минимальной и максимальной глубине, максимальное – в пробах на глубине от 3 до 9 м (1,66–1,89%). Изменение содержания гексановых экстрактов (ГЭ) в сухой массе КДО в зависимости от глубины залегания не имеет чёткого закономерного характера.

Содержание ГЭ в сухом этилацетатном экстракте лежит в основном в пределах 50%. Минимальное содержание обнаружено в первой пробе на глубине до 1,5 м (34,9%), максимальное – в последней пробе на глубине 27,0 м, где оно достигает 66% сухой массы этилацетатного экстракта.

Анализ полученных гексановых экстрактов методом тонкослойной хроматографии показал, что ГЭ содержат вещества с коэффициентом подвижности 0,61, совпадающие с дигидрокверцетином и некоторыми фенолокислотами, ранее уже обнаруженными нами в этилацетатных экстрактах.

Методом высокоэффективной жидкостной хроматографии в гексановых экстрактах обнаружено шесть соединений фенольной природы, из которых четыре по хроматографическим и спектральным характеристикам идентифицированы как протокатеховая, ванилиновая кислоты, *транс-п*-кумаровая кислота и её *цис*-изомер.

**Ключевые слова:** кородревесные отходы, этилацетатные экстракты, гексановые экстракты, флавоноиды, кверцетин, дигидрокверцетин, фенолокислоты.

## Comprehensive study of the content of biologically active substances in the destruction products of bark-wood waste generated during long-term storage

© 2023. T. I. Shirshova ORCID: 0000-0001-8938-612X\*  
I. V. Beshley ORCID: 0000-0002-9195-332X\*  
K. G. Ufimtsev ORCID: 0000-0002-8708-4213\*

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 study of the content of biologically active substances in the samples of the bark-wood waste destruction products (BWW) was continued. BWW were taken at a depth of 1 to 27 meters of the bark dump of OJSC Syktyvkar LDK, located in the Forestry microdistrict of Syktyvkar. The hexane-soluble substances content is in ranges from 0.78 to 1.89% of the dry mass of BWW. The minimum content was found in the first (0.24%) and last samples (0.21%) at the minimum and maximum depth, the maximum – in samples at a depth of 3 to 9 m (1.66–1.89%). The variation of the hexane extract (HE) content in BWW's dry mass depending on the depth of occurrence is not clear.

The HE content in the dry ethyl acetate extract is mainly within 50%. The minimum content was found in the first sample at a depth of up to 1.5 m (34.9%), the maximum in the last sample at a depth of 27.0 m, where it reaches 66% of the dry weight of the ethyl acetate extract.

The analysis of the obtained hexane extracts by thin-layer chromatography showed that the HE contains substances with a mobility coefficient of 0.61, which coincide with dihydroquercetin and some phenolic acids previously detected in ethyl acetate extracts.

Six phenolic compounds were detected by high-performance liquid chromatography in hexane extracts. Protocatechic acid, vanillic acid, trans-p-coumaric acid and its cis isomer were identified by chromatographic and spectral characteristics.

**Keywords:** bark and wood waste, ethyl acetate extracts, hexane extracts, flavonoids, quercetin, dihydroquercetin, phenolic acids.

Утилизация отходов целлюлозно-бумажной и лесоперерабатывающей промышленности в нашей стране представляет большую и наиболее острую проблему, которая чрезвычайно актуальна и для Республики Коми [1]. Глубокая переработка древесины с превращением её основных компонентов в товарные продукты с высокой добавленной стоимостью является одним из направлений био-рефайнинга, к которому можно отнести и использование для этих целей отходов кородревесных отходов. Почти 100 лет (с 1926 г.) существует свалка кородревесных отходов в микрорайоне Лесозавод г. Сыктывкара. Наиболее активный период накопления отходов приходился на 1950–2010 гг. Полигон представляет собой отвал кородревесных отходов длительного срока хранения (КДОДСХ) площадью до 11 га, высотой до 27 м, объёмом до 1120 тыс. м<sup>3</sup> [2, 3].

Основными видами перерабатываемой древесины в Республике Коми является древесина ели, сосны и берёзы с небольшой примесью пихты. От 7 до 15% их объёма составляет кора. По химическому составу кора существенно отличается от древесины соответствующих деревьев и является уникальным и практически неисчерпаемым источником целого ряда ценных биологически активных веществ (БАВ). В коре содержание целлюлозы значительно меньше, чем в древесине, но гораздо выше содержание экстрактивных и минеральных веществ. Экстракцией растворителями разной полярности из неё можно извлечь широкий спектр БАВ, в том числе с высокими антиоксидантными и другими полезными свойствами [4–8].

При изучении химического состава полифенольного комплекса некоторых видов пихты, ели и сосны было показано, что он является сложной смесью фенольных соединений, в том числе флавоноидов, представляющих одну из самых многочисленных и широко распространённых групп природных соединений, интересных как с экологической точки зрения [9–14], так и с точки зрения использования их в качестве биологически активных препаратов и других ценных продуктов с высокой добавленной стоимостью [15–18].

Ряд новых природных БАВ с широким спектром биологической активности был выделен из лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) и лиственницы даурской (или Л. Гмелина) (*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.). В коре лиственницы сибирской основными флавоноидными соединениями являются дигидрокверцетин (ДГК) и дигидрокемпферол, совместное присутствие которых в древесине лиственницы считают хемотаксономическим признаком рода *Larix* Mill. [19, 20]. Ценными компонентами антиоксидантного комплекса коры и древесины лиственницы сибирской являются также фенолокислоты – оксibenзойные (*n*-оксibenзойная, протокатеховая, ванилиновая, сиреневая) и гидроксикоричные кислоты (*para*-кумаровая, феруловая, кофейная). Во фракции фенолокарбоновых кислот, выделенной из смолистого экстракта древесины, были обнаружены методами тонкослойной (ТСХ) и высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) и идентифицированы ванилиновая и феруловая кислоты [19, 21].

В настоящее время исследования, связанные с поиском и выделением ценных экстрактивных веществ из КДО и их комплексной переработкой в полезные для народного хозяйства продукты, имеют большую актуальность. В связи с этим нами продолжены комплексные исследования содержания БАВ и других полезных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов, взятых с отвала КДО (отвал – участок складирования отходов лесопильного производства) по градиенту высоты полигона, методом бурения двух скважин, представляющих выработки круглого сечения, вертикально пробурённые с поверхности отвала на глубину 20 м (скважина 1) и 27 м (скважина 2). Было отобрано 16 проб из скважины 1 и 13 проб – из скважины 2.

Экстракцией органическими растворителями различной полярности были получены экстрактивные вещества, представляющие интерес как источник БАВ с высокой антиоксидантной активностью (АОА). Было показано, что в зависимости от глубины залегания масса этилацетатных экстрактов из КДО составляет 1,8–2,9% (скважина 1) и 1,4–4,4% сухого ве-

щества (скважина 2). Содержание фенольных соединений в этилацетатном экстракте лежит в интервале 49–64 (скважина 1) и 45–57% сухой массы экстрактов (скважина 2). На основании данных ТСХ и ВЭЖХ установлено, что в состав фенольной фракции входит до восьми соединений, из которых четыре представлены гидрокоричными и фенолокислотами, а также вещество, по хроматографическим и спектральным характеристикам идентифицированное как дигидрокверцетин [3].

Целью нашей работы является комплексное исследование содержания биологически активных веществ в кородревесных отходах длительного срока хранения при экстракции растворителями различной полярности.

### Объекты и методы исследования

Продолжены исследования химического состава образцов КДО, взятых на короотвале ОАО «Лесопромышленной компании «Сыктывкарский ЛДК» на различной глубине [3]. Сухие этилацетатные экстракты, полученные из проб, взятых на разной глубине, настаивали с гексаном в течение трёх суток при соотношении твёрдого вещества и экстрагента 1 : 100. Гексановые экстракты сливали декантацией. Выпавшие при стоянии на холоде осадки белого цвета отделяли фильтрацией на складчатом фильтре. Маточки упаривали в вакууме на роторном испарителе досуха и определяли массу гравиметрическим методом.

Тонкослойную хроматографию проводили на пластинах «Sorbfil» (Россия) размером 10 × 10 см и 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%-ный раствор фосфорномолибденовой кислоты (ФМК) в 95%-ном этиловом спирте. В качестве растворов сравнения (ТСХ и ВЭЖХ) использовали стандартные образцы кверцетина, дигидрокверцетина, апигенина, рутина, галловой, феруловой, ванилиновой, сиреневой, 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, петля – 20 мкл и детектор Smartline 2600 на диодной матрице. Детекцию проводили при длине волны 254 нм. В качестве подвижной фазы использовали смесь вода : ацетонитрил : фосфорная кислота =

85 : 15 : 0,05. Скорость элюирования – 0,7 мл/мин, температура колонки 25 °С. Образцы перед анализом очищали методом твёрдофазной экстракции на патронах ДИА-ПАК C16. В качестве стандартов использовали ванилиновую кислоту (Fluka), *транс*-кумаровую (Alfa Aesar), протокатеховую (Alfa Aesar), сиреневую (Acros), феруловую (Acros), кофейную (Sigma) кислоты.

### Результаты и обсуждение

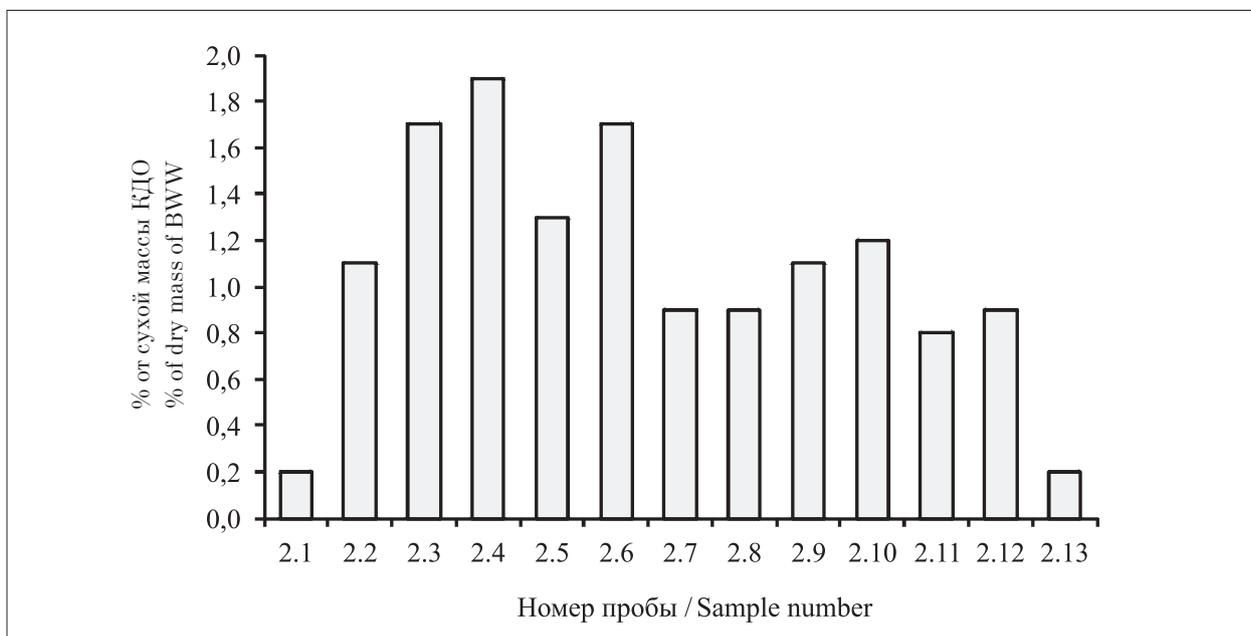
Изменение содержания ГЭ в сухой массе КДО в зависимости от глубины залегания не имеет чёткого закономерного характера. Как видно на рисунке 1, минимальное его содержание обнаружено в первой (0,24%) и последней пробах (0,21%) на минимальной и максимальной глубине, максимальное – в пробах на глубине от 3 до 9 м (1,66–1,89%).

Содержание ГЭ в сухом этилацетатном экстракте лежит в основном в пределах 50%. Минимальное содержание обнаружено в первой пробе на глубине до 1,5 м (34,9%), максимальное – в последней пробе на глубине 27,0 м и достигает 66% сухой массы этилацетатного экстракта (рис. 2).

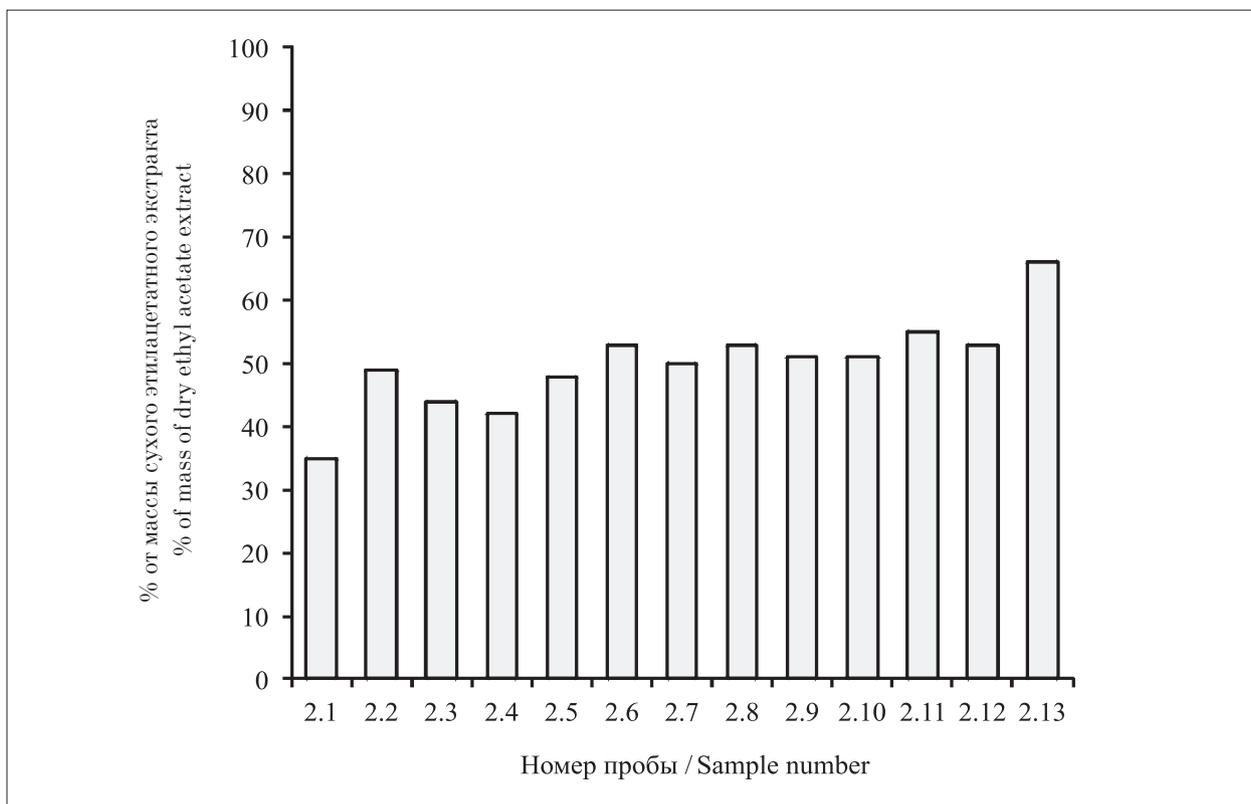
Выпавшие из ГЭ при стоянии на холоде осадки белого цвета хорошо растворяются в хлороформе и эфире. На ТСХ растворённые в хлороформе осадки дают одинаковую картину, представлены вытянутым пятном с максимальной концентрацией в точке, отвечающей  $R_f = 0,61$  (соединение 1), совпадающей как с хроматографической подвижностью ДГК, так и некоторых фенолокислот (табл. 1).

На пластинах Sorbfil с длиной пробега 10 см коэффициенты подвижности ванилиновой, кумаровой и феруловой кислот различаются только в четвёртом знаке, то есть практически совпадают. На пластинах Alugram разброс несколько больше. Все стандартные и исследуемые вещества в УФ-свете имеют интенсивное сине-голубое свечение. При проявлении ФМК пятна апигенина, рутина, ванилиновой и протокатеховой кислот окрашиваются в бежевый цвет, все остальные – в густо-синий.

Результаты ВЭЖХ-анализа, представленные в таблице 2, показывают, что в состав гексановых экстрактов входит шесть соединений фенольной природы. Соединения со временем удерживания  $t_R$  6,2, 11,4, 22,3 мин и их УФ-спектры полностью совпадают со стандартными образцами протокатеховой, ванилиновой и *n*-кумаровой кислот. Идентичность УФ-спектров соединения 3 и *транс*-*n*-



**Рис. 1.** Содержание гексановой фракции в сухой массе КДО на разной глубине залегания. Примечание (рис. 1 и 2): номер пробы (глубина залегания, м): 2.1 (0–1,5), 2.2 (1,5–3,0), 2.3 (3,0–4,0), 2.4 (4,0–6,0), 2.5 (6,0–7,5), 2.6 (7,5–9,0), 2.7 (9,0–12,0), 2.8 (12,0–15,0), 2.9 (15,0–18,0), 2.10 (18,0–21,0), 2.11 (21,0–24,0), 2.12 (24,0–27,0), 2.13 (27,0)  
**Fig. 1.** The hexane fraction content in the BWW dry mass at different depths of occurrence. Note (fig. 1 and 2): sample number (sample depth, m): 2.1 (0–1,5), 2.2 (1,5–3,0), 2.3 (3,0–4,0), 2.4 (4,0–6,0), 2.5 (6,0–7,5), 2.6 (7,5–9,0), 2.7 (9,0–12,0), 2.8 (12,0–15,0), 2.9 (15,0–18,0), 2.10 (18,0–21,0), 2.11 (21,0–24,0), 2.12 (24,0–27,0), 2.13 (27,0)



**Рис. 2.** Содержание гексановой фракции в сухом этилацетатном экстракте КДО на разной глубине залегания  
**Fig. 2.** The hexane fraction content in BWW dry ethyl acetate extract at different depths of occurrence

Таблица 1 / Table 1

Хроматографическая подвижность ( $R_f$ ) стандартов и компонентов гексановых экстрактов  
Chromatographic mobility ( $R_f$ ) of standards and hexane extract components

Название вещества / Name of the substance	Вид пластин / Plate type	
	Sorbfil	Alugram
Рутин / Rutine	0,06	0,04
Дигидрокверцетин / Dihydroquercetin	0,61	0,61
Кверцетин / Quercetin	0,67	0,67
Апигенин / Apigenin	0,69	0,65
Галловая кислота / Gallic acid	0,63	0,53
Кофейная кислота / Caffeic acid	0,67	0,62
Ванилиновая кислота / Vanillic acid	0,71	0,65
Кумаровая кислота / Coumaric acid	0,71	0,66
Феруловая кислота / Ferulic acid	0,71	0,63
Соединение 1 / Compound 1	0,61	0,61
Соединение 2 / Compound 2	0,36	0,43

Таблица 2 / Table 2

Характеристики фенольных соединений, обнаруженных методом ВЭЖХ в гексановых экстрактах  
КДО / Characteristics of phenolic compounds detected by HPLC in BWW hexane extracts

Соединение Compound	Время удерживания ( $t_R$ ), мин Retention time ( $t_R$ ), min	Спектральные данные ( $\lambda_{max}$ ), нм Spectral data ( $\lambda_{max}$ ), nm
Протокатеховая кислота Protocatechic acid	6,2	218, 258, 295
Соединение 1 / Compound 1	7,6	207, 253
Ванилиновая кислота Vanillic acid	11,4	217, 260, 295
Соединение 2 / Compound 2	13,7	220, 282
<i>цис</i> - <i>n</i> -кумаровая кислота (соединение 3) / <i>cis-p</i> -coumaric acid (compound 3)	17,6	230, 280, 310
<i>транс</i> - <i>n</i> -кумаровая кислота <i>trans-p</i> -coumaric acid	22,3	225, 280, 309

кумаровой кислоты, в которых присутствуют полосы поглощения 280 и 310 нм, характерные для кумаринов [22], позволяет предположить, что соединение 3 является её *цис*-изомером.

Испанскими учёными при исследовании фенольных соединений винного осадка были обнаружены два изомера кумаровой кислоты с одинаковым молекулярным ионом в масс-спектре ( $[M-H]^- 163 m/z$ ) – *транс*-*n*-кумаровая кислота и её *цис*-изомер [22].

По высоте пиков на хроматограмме главными компонентами в экстракте являются соединения 1 и 3, структура которых требует дополнительного уточнения, а также ванилиновая кислота, содержание которой составляет 0,014% массы экстракта, *цис*- и *транс*-*n*-кумаровые и протокатеховая кислоты, обнаруженные в следовых количествах. Низкая концентрация веществ фенольной природы связана с присутствием в отвалах не только отходов леспро-

мышленности, но и некоторых видов бытового мусора. По информации администрации МОГО «Сыктывкар», основное количество кородревесных отходов в отвалах было накоплено в период с 1950 по 2010 гг. В 1990–2000-е гг. на свалку вывозили и смёт с улиц города – песок, камни, бытовой мусор, листья, ветки [2].

### Заключение

Исследовано содержание биологически активных веществ в продуктах деструкции кородревесных отходов, взятых на разной глубине короотвала ОАО «Сыктывкарский ЛДК», расположенного в микрорайоне Лесозавод г. Сыктывкара. Установлено содержание веществ, растворимых в гексане, составляющее от 0,78 до 1,89% сухой массы КДО. Минимальное содержание обнаружено в первом образце (0,24%), взятом на глубине до 3 м,

и в последнем образце на глубине 27 м (0,21%). Наибольшее количество ГЭ содержится в пробах на глубине от 3 до 9 м (1,66–1,89%). Изменение содержания ГЭ в сухой массе КДО в зависимости от глубины залегания не имеет чёткого закономерного характера.

Содержание ГЭ в сухом этилацетатном экстракте лежит в основном в пределах 50%. Минимальное содержание обнаружено в этилацетатных экстрактах первой пробы, взятой на глубине до 1,5 м (34,9%), максимальное – в последней пробе, взятой на глубине 27,0 м, где оно достигает 66% сухой массы этилацетатного экстракта.

Анализ полученных гексановых экстрактов методом ТСХ показал, что они содержат вещества с коэффициентом подвижности 0,61, совпадающие с ДГК и некоторыми фенолоксидами, ранее обнаруженными нами в этилацетатных экстрактах. Методом ВЭЖХ в гексановых экстрактах обнаружено шесть соединений фенольной природы, из которых четыре по хроматографическим и спектральным характеристикам идентифицированы как протокатеховая, ванилиновая, *транс-п*-кумаровая кислота и её *цис*-изомер.

Как показали результаты ТСХ-анализа, компонентный состав фенольных фракций всех исследованных нами образцов КДО, взятых на разной глубине, идентичен. Количественное содержание различается, но закономерностей в зависимости от глубины залегания не обнаружено, что объясняется неоднородностью сбрасываемых отходов. Методом ВЭЖХ подтверждено наличие в этилацетатных экстрактах дигидрокверцетина, принятого за эталон высокой антиоксидантной активности, установлено наличие четырёх фенолоксилов – протокатеховой, ванилиновой, *транс-п*-кумаровой кислоты и её *цис*-изомера, также проявляющих высокую АОА, что открывает перспективы использования различных фракций КДО для разработки субстанций различного народнохозяйственного назначения.

*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*

### Литература

1. Зелёная экономика и цели устойчивого развития для России: коллективная монография / Под науч. ред.

С.Н. Бобылёва, П.А. Кирюшина, О.В. Кудрявцевой. М.: Экономический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, 2019. 284 с.

2. Володин В.В., Шубаков А.А., Володина С.О., Шергина Н.Н., Васильев Р.Г. Тенденции в развитии методов утилизации коры и кородревесных отходов длительного хранения (обзор) // *Аграрная наука Северо-Востока*. 2022. Т. 23. № 5. С. 611–632.

3. Уфимцев К.Г., Бешлей И.В., Ширшова Т.И. Содержание экстрактивных веществ в продуктах деградации кородревесных отходов, образующихся при длительном хранении, с учётом вертикального градиента // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 4. С. 132–138.

4. 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 // *Philosophical transactions of the Royal Society a mathematical, physical and engineering sciences*. 2021. V. 379. No. 2206. Article No. 20200345.

5. Капица Е.А., Шорохова Е.В., Ромашкин И.В., Галибина Н.А., Никерова К.М., Казарцев И.А. Разложение коры в составе порубочных остатков после сплошных рубок в среднетаёжных лесах // *Лесоведение*. 2019. № 1. С. 38–48.

6. Дейнеко И.П., Дейнеко И.В., Белов Л.П. Исследование химического состава коры сосны // *Химия растительного сырья*. 2007. № 1. С. 19–24.

7. 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. P. 1–17.

8. Колесникова А.В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // *Актуальные вопросы экономических наук*. 2013. № 33. С. 116–120.

9. Щербатов А.В., Чистякова М.В., Усманов И.Ю. Экологические аспекты регуляции пластичности накопления флавоноидов на Южном Урале // *Вестник Башкирского университета*. 2011. Т. 16. № 4. С. 1198–1205.

10. Полякова Л.В., Ершова Э.А. Изменчивость фенольных соединений у некоторых травянистых и древесных растений от межпопуляционного до внутрииндивидуального (эндогенного) уровня // *Химия растительного сырья*. 2000. № 1. С. 121–129.

11. Dixon R.A., Pasinetti G.M. Flavonoids and isoflavonoids: from plant biology to agriculture and neuroscience // *Plant Physiology*. 2010. V. 154. No. 2. P. 453–457.

12. Барабой В.А. Фармакология флавоноидов // *Материалы VII международного симпозиума по фенольным соединениям: фундаментальные и прикладные аспекты*. М.: Изд-во Института физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, 2009. С. 26–27.

13. Тюкавкина Н.А., Зурабян С.Э., Белобородов В.Л., Лузин А.П., Селиванова И.А., Артемьева Н.Н.,

Хвостова А.И. Органическая химия. Учебник для вузов. Книга 2. Специальный курс. М.: Дрофа, 2008. 592 с.

14. Высочина Г.И. Проблемы изменчивости в хемотаксономических исследованиях растений // Сибирский ботанический вестник. 2007. Т. 2. Вып. 1. С. 101–110.

15. Громова А.С., Луцкий В.И., Ганенко Т.В., Тюкавкина Н.А. Флавоноиды из коры некоторых видов пихты, ели и сосны // Химия древесины. 1978. № 4. С. 103–105.

16. Фёдорова Т.Е., Бабкин В.А. Экстрактивные вещества корней *Picea obovata* Ledeb. // Химия растительного сырья. 2016. № 4. С. 165–168.

17. Metsämuuronen S., Sirén H. Bioactive phenolic compounds, metabolism and properties: a review on valuable chemical compounds in Scots pine and Norway spruce // Phytochemistry Reviews. 2019. V. 18. P. 623–664.

18. Бабкин В.А., Остроухова Л.А., Иванова С.З., Иванова Н.В., Медведева Е.Н., Малков Ю.А., Трофимова Н.Н., Фёдорова Т.Е. Продукты глубокой химической переработки биомассы лиственницы. Технология получения и перспективы использования // Российский химический журнал. 2004. Т. 48. № 3. С. 62–69.

19. Бабкин В.А., Остроухова Л.А., Трофимова Н.Н. Биомасса лиственницы: от химического состава до инновационных продуктов. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 2011. 235 с.

20. Бабкин В.А. Экстрактивные вещества древесины лиственницы: химический состав, биологическая активность, перспективы практического использования // Инноватика и экспертиза. 2017. Вып. 2 (20). С. 210–224.

21. Блажей А., Шутый Л. Фенольные соединения растительного происхождения. М.: Мир, 1977. 239 с.

22. Mir-Cerd A., Carretero I., Coves J.R., Pedrouso A., Castro-Barros C.M., Alvarino T., Cortina J.L., Saurina J., Granados M., Sentellas S. Recovery of phenolic compounds from wine lees using green processing: Identifying target molecules and assessing membrane ultrafiltration performance // Science of the Total Environment. 2023. V. 857. Article No. 159623.

## References

1. Green Economy and the goals of sustainable development for Russia: a collective monograph / Eds. S.N. Bobylev, P.A. Kiryushin, O.V. Kudryavtseva. Moskva: Ekonomicheskiiy fakultet MGU imeni M.V. Lomonosova, 2019. 284 p. (in Russian).

2. 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) // Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2022. V. 23. No. 5. P. 611–632 (in Russian). doi: 10.30766/2072-9081.2022.23.5.611-632

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. Wenig C., Dunlop J.W.C., Hehemeyer-Cürten J., Reppe F.J., Horbelt N., Krauthausen K., Fratzi P., Eder M. Advanced materials design based on waste wood and bark // Philosophical transactions of the Royal Society a mathematical, physical and engineering sciences. 2021. V. 379. No. 2206. Article No. 20200345. doi: 10.1098/rsta.2020.0345

5. 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

6. Deyneko I.P., Deyneko I.V., Belov L.P. Study of the chemical composition of pine bark // Khimiya rastitelnogo syr'ya. 2007. No. 1. P. 19–24 (in Russian).

7. 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

8. 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).

9. Scherbakov A.V., Chistyakova M.V., Usmanov I.Yu. Ecological aspects of regulation of the plasticity of accumulation of flavonoids in the Southern Urals // Vestnik Bashkirskogo universiteta. 2011. V. 16. No. 4. P. 1198–1205 (in Russian).

10. Polyakova L.V., Ershova E.A. Variability of phenolic compounds in some herbaceous and woody plants from the inter-population to intra-individual (endogenous) level // Khimiya rastitelnogo syr'ya. 2000. No. 1. P. 124–129 (in Russian).

11. Dixon R.A., Pasinetti G.M. Flavonoids and isoflavonoids: from plant biology to agriculture and neuroscience // Plant Physiology. 2010. V. 154. No. 2. P. 453–457. doi: 10.1104/pp.110.161430

12. Baraboy V.A. Pharmacology of flavonoids // Materialy VII mezhdunarodnogo simpoziuma po fenolnym soedineniyam: fundamentalnye i prikladnye aspekty. Moskva: Izdatelstvo Instituta fiziologii rasteniy im K.A. Timiryazeva RAN, 2009. P. 26–27 (in Russian).

13. Tyukavkina N.A., Zurabyan S.E., Beloborodov V.L., Luzin A.P., Selivanova I.A., Artemyeva N.N., Khvostova A.I. Organic chemistry. Textbook for universities. Book 2. Special Course. Moskva: Drofa, 2008. 592 p. (in Russian).

14. Vysochina G.I. Problems of variability at chemotaxonomic studies of plants // Sibirskiy botanicheskiy vestnik. 2007. V. 2. No. 1. P. 101–110 (in Russian).

15. Gromova A.S., Lutskiy V.I., Tyukavkina N.A. Flavonoids from the bark of some fir, spruce and pine species // Khimiya drevesiny. 1978. No. 4. P. 99–102 (in Russian).

16. Fedorova T.E., Babkin V.A. Extractive substances of the roots of *Picea obovata* Ledeb. // *Khimiya rastitelnogo syrya*. 2016. No. 4. P. 165–168 (in Russian). doi: 10.14258/jcprm.2016041401
17. Metsämuuronen S., Sirén H. Bioactive phenolic compounds, metabolism and properties: a review on valuable chemical compounds in Scots pine and Norway spruce // *Phytochemistry Reviews*. 2019. V. 18. P. 623–664. doi: 10.1007/s11101-019-09630-2
18. 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. Production technology and prospects for use // *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal*. 2004. V. 48. No. 3. P. 62–69 (in Russian).
19. Babkin V.A., Ostroukhova L.A., Trofimova N.N. Larch biomass: from chemical composition to innovative products. Novosibirsk: Izdatelstvo SO RAN, 2011. 235 p. (in Russian).
20. Babkin V.A. Extractive substances of larch wood: chemical composition, biological activity and prospects for practical use // *Innovatika i ekspertiza*. 2017. No. 2 (20). P. 210–224 (in Russian).
21. Blazhey L., Shutyy A. Phenolic compounds of plant origin. Moskva: Mir, 1977. 239 p. (in Russian).
22. Mir-Cerdà A., Carretero I., Coves J.R., Pedrouso A., Castro-Barros C.M., Alvarino T., Cortina J.L., Saurina J., Granados M., Sentellas S. Recovery of phenolic compounds from wine lees using green processing: Identifying target molecules and assessing membrane ultrafiltration performance // *Science of the Total Environment*. 2023. V. 857. Article No. 159623. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159623

## Study of the efficiency of water treatment from ammonium ions by a calcined sorbent from ash-and-slag waste

© 2023. Т. Г. Короткова ORCID: 0000-0001-9278-871X<sup>3</sup>

А. М. Заколюкина ORCID: 0000-0002-9879-531X<sup>3</sup>

С. А. Бушумов ORCID: 0000-0001-7227-0614<sup>3</sup>

The Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya St., Krasnodar, Russia, 350072,  
e-mail: korotkova1964@mail.ru

Experimental studies of sorption on water treatment from ammonium ions by a calcined sorbent based on ash-and-slag waste from thermal power engineering have been carried out. The calcined sorbent was obtained by calcining samples of ash-and-slag from coal combustion at the Novocherkassk State District Power Plant at a temperature of 600 °C for 30 min. The sorption capacity of a sorbent with a dose of 2.0 g per 50 mL of a model solution, a stirrer speed of 200 rpm, pH 7, and sorption time from 10 to 180 minutes was studied. The influence of the initial concentration of model solutions with the content of ammonium ions 5, 20, 50 and 100 mg/L on the amount of adsorption and treatment efficiency was studied. The highest treatment efficiency of 60% was obtained for an initial concentration of ammonium ions in a solution of 20 mg/L. Processing of experimental data was carried out according to the models of pseudo-first, pseudo-second-order and intra-particle diffusion kinetics. The best description of the experimental data was obtained using the pseudo-first-order model, which has the highest value of the coefficient of determination. The adsorption equilibrium in the system ammonium ions – calcined sorbent was studied for the initial concentration of ammonium ions in solution: 5, 20, 30, 50, 100, 200, 300 mg/L. Processing of experimental data on equilibrium was carried out on the basis of two-parameter adsorption isotherms: Langmuir, Freundlich and Temkin. The value of the coefficient of determination according to the Langmuir isotherm is the largest  $R^2 = 0.9904$ . Dependences between the cleaning efficiency at adsorption equilibrium and the initial concentration of ammonium ions in solution for the system ammonium ions – calcined sorbent are obtained. With an increase in the initial concentration of ammonium ions in the solution, the treatment efficiency at low initial concentrations increases, and decreases with increasing concentration.

**Keywords:** treatment efficiency, ammonium ion, sorbent, ash-and-slag waste.

УДК 661.183

## Исследование эффективности очистки воды от ионов аммония прокалённым сорбентом из золошлаковых отходов

© 2023. Т. Г. Короткова, д. т. н., профессор,

А. М. Заколюкина, м. н. с., С. А. Бушумов, м. н. с.,

Кубанский государственный технологический университет,

350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2,

e-mail: korotkova1964@mail.ru

Проведены экспериментальные исследования сорбции по очистке воды от ионов аммония прокалённым сорбентом на основе золошлаковых отходов теплоэнергетики. Прокалённый сорбент получен путём прокаливания образцов золошлака от сжигания угля Новочеркасской ГРЭС при температуре 600 °C в течение 30 мин. Исследована сорбционная способность сорбента с дозой массой 2,0 г на 50 см<sup>3</sup> модельного раствора, частота вращения перемешивающего устройства 200 об./мин, pH 7, время сорбции от 10 до 180 мин. Изучено влияние исходной концентрации модельных растворов с содержанием ионов аммония 5, 20, 50 и 100 мг/дм<sup>3</sup> на величину адсорбции и эффективность очистки. Наибольшая эффективность очистки 60% получена для исходной концентрации ионов аммония в растворе 20 мг/дм<sup>3</sup>. Обработка экспериментальных данных проведена по моделям кинетики псевдопервого, псевдодвухпорядка и диффузионной. Лучшее описание экспериментальных данных получено по модели псевдопервого порядка, имеющей наибольшее значение коэффициента детерминации. Изучено адсорбционное равновесие в системе ионы аммония – прокалённый сорбент для исходной концентрации ионов аммония в растворе: 5, 20, 30, 50, 100, 200, 300 мг/дм<sup>3</sup>. Обработка экспериментальных данных по равновесию проведена на основе двухпараметрических изотерм адсорбции: Ленгмюра, Фрейндлиха и Темкина. Значение величины коэффициента детерминации по изотерме Ленгмюра является наибольшим  $R^2 = 0.9904$ . Получены зависимости между эффективностью очистки при

адсорбционном равновесии и исходной концентрацией ионов аммония в растворе для системы ионы аммония – прокалённый сорбент. С ростом исходной концентрации ионов аммония в растворе эффективность очистки при малых исходных концентрациях возрастает, а с увеличением концентрации падает.

**Ключевые слова:** эффективность очистки, ион аммония, сорбент, золошлаковые отходы.

The presence of ammonium ions in surface and wastewater (WW) indicates their bacterial contamination by pathogenic microorganisms. This is due either to the location of the water body near the disposal site for hazardous objects [1], or to insufficient treatment of household wastewater [2]. In work [3], various technologies for wastewater treatment are considered and the characteristics of sorbents and research conditions are given. A large number of works are devoted to the study of mineral natural zeolites for the treatment of wastewater from ammonium ions, such as clinoptilolite [4–6], calcium bentonite [7], halloysite [8], analcime [9], dispersed silica [10], etc.

Currently, the treatment of wastewater from ammonium ions using sorbents based on industrial waste has become widespread. Let's look at this issue in more detail.

In a study [11], the authors used activated carbon obtained from coconut shells as a sorbent to purify water from ammonium ions (India). The coconut shell was heated to 400 °C in increments of 10 °C/min in an inert atmosphere of nitrogen, and upon reaching 400 °C, it was kept for 4 hours. The resulting coal weighing 50 g was treated with 250 g of an aqueous 85% solution of orthophosphoric acid with permanent stirring and heating up to 85 °C for 4 hours. Then the sample was dried in vacuum at a temperature of 110 °C for 24 hours. Next, the sample was activated in a vertical cylindrical muffle at 800 °C in a nitrogen flow at a nitrogen flow rate of 100 mL/min. The samples were washed with water until the pH value was neutral and dried at 110 °C to obtain activated carbon. The resulting sorbent weighing 2 g was placed in a flask with 50 mL of a solution containing ammonium ions. In the test mixtures, we varied the pH values of solutions (5, 6, 7, 8, 9 and 10 pH units), solution temperatures (10, 20, 30, 40 and 50 °C), contact time (up to 120 min), and initial ion concentration ammonium (500, 1000, 1500 and 2000 mg/L), sorbent particle size (300 and 600 μm). Based on the data obtained, Langmuir and Freundlich isotherms were constructed and thermodynamic coefficients were determined. At a solution pH value of 9, temperature 10 °C, initial concentration of ammonium ions 500 mg/L, the maximum equilibrium value

of sorption capacity was noted to be 2.48 and 2.28 mg/g for sorbents with particle sizes of 300 and 600 μm, respectively.

In [12], scientists from Nepal and South Korea used activated carbon obtained from waste tires by pyrolysis in various media as a sorbent to purify water from ammonium ions. The adsorption isotherm and kinetic curves were studied at the optimal pH value of 9. The adsorption isotherm was better fitted by the Freundlich model than by the Langmuir model. The equilibrium adsorption capacity of the monolayer, calculated by Langmuir, was 277.8 mg/g at room temperature. The adsorption reached equilibrium after 120 min, and the kinetic data fit well to a pseudo-second-order model with a constant rate of  $5.3 \cdot 10^{-3} \text{ L} \cdot \text{g} / (\text{mg} \cdot \text{min})$ . Adsorption of ammonium ions by activated carbon was carried out from real water samples collected from different places in the Kathmandu Valley (Nepal).

In [13], the authors studied zeolite waste from fluid catalytic cracking units, which are widely used in the oil refining industry, as the basis of a sorbent for treating water from ammonium ions.

In [14], the authors used fly ash from coal combustion, generated at a thermal power plant in Shanghai (China), as the basis of a sorbent for purifying water from ammonium ions. A sample of fly ash weighing 15 g was treated with 150 mL of 2.0 M sodium hydroxide solution at boiling for 48 hours. Afterwards, the mixture was centrifuged and the supernatant was removed. The precipitate was washed three times with double-distilled water, then twice with ethanol, and dried at a temperature of 45 °C. Next, the sample was treated with 0.01, 0.1, 0.9 and 1.8 M solutions of sulfuric acid for 6 hours, the precipitate was separated by centrifugation, washed with double-distilled water and alcohol and dried. Then samples weighing 0.4 g were placed in 40 mL of a solution containing 2.5 to 1200 mg/L of ammonium nitrogen and the mixture was stirred for 24 hours at room temperature. The highest degree of extraction, about 60%, was achieved when a sample treated with a 0.01 M sulfuric acid solution interacted with a solution containing 10 mg/L of ammonium nitrogen. The effect of solution pH on the degree of extraction of ammonium ions was studied.

The degree of extraction of ammonium ions is about 60% and is in the pH range of solutions from 5 to 10.

Chinese scientists in a study [15] used two types of fly ash from coal combustion generated at thermal power plants (Yunnan Province) to purify water from ammonium ions: high calcium oxide content 37.55% and low calcium oxide content 3.31%. A sample of fly ash was treated with sodium hydroxide solution, dried at a temperature of 100 °C for 12 hours and sifted through a sieve with a mesh size of 150 µm. To study the equilibrium, the resulting sorbents weighing 0.1 g were placed in a conical flask with a capacity of 100 mL, 50 mL of a solution with an ammonium ion concentration of 100 mg/L was added, and the mixture was stirred at a stirring speed of 180 rpm for 360 min on a thermostatic shaker at a temperature of 25 °C. Equilibrium occurred within 60 minutes, so for further studies a contact time of 1.25 hours (75 minutes) was adopted. To study the kinetics of the adsorption process, the authors placed 0.1 g of sorbent in a conical flask with a capacity of 100 mL, added 25 mL of a solution with a concentration of ammonium ions from 10 to 300 mg/L, adjusted the pH of the solution to a value of 8 (optimal pH) and stirred the mixture at rotation speed of the mixing device is 180 rpm for 75 minutes on a thermostatic shaker at a temperature of 25 °C. The value of the mass fraction of ammonium ions in the sorbent under experimental conditions reached about 2 and 16 mg/g for samples with high and low calcium content, respectively, and equilibrium occurred already at 60 min. The results are presented in the form of Langmuir and Freundlich isotherms. The calculated equivalent values of the mass fraction of ammonium ions in the sorbent were 3.17 and 23.8 mg/g for samples with high and low calcium content, respectively.

Indonesian scientists conducted studies of fly ash from coal combustion at five power plants to purify model WW solutions from ammonium ions. 300 mL of a model solution with an ammonium ion concentration of 780 mg/L was placed in glass containers with a volume of 500 mL. Then 4.5 and 7.0 g of fly ash were added as a sorbent and sorption was carried out for 150 minutes at a mixing device rotation speed of 180 rpm at pH 8. The maximum degree of ammonium ion extraction of 14% was achieved at a sorbent dose of 4.5 g, and 17% at a dose of 7.0 g. The adsorption value of ammonium ions in the saturated sorbent was 7.17 mg/g [16].

The treatment of wastewater samples from sewage treatment plants from ammonium ions

(Zaragoza, Spain) before discharge into the Ebro River was carried out with zeolites of various properties and compositions obtained on the basis of alkaline hydrothermal treatment of fly ash samples [17]. Various doses of sorbent were placed into a 20 mL WW sample with permanent stirring for 30 min at room temperature. The efficiency of ammonium ions extraction from the WW sample by three different zeolites during static sorption ranged from 50 to 84%. With dynamic sorption by passing 50 mL of dry matter through a column filled with 100 g of sorbent, the efficiency of ammonium ion extraction reached 71%.

We have developed a calcined sorbent from ash-and-slag waste (ASW) of the Novocherkassk State District Power Plant [18], the physicochemical parameters of which were determined and presented in [19]. The calcined sorbent has been tested for the treatment of wastewater from petroleum products [20]. It has been experimentally established that the sorbent has adsorption capacity towards ammonium ions. The use of ash waste throughout Russia will reduce the alienation of territory and reduce the risk of illness for people living in residential buildings near ash dumps.

The purpose of the work is to experimentally study the sorption treatment of water from ammonium ions using a calcined sorbent.

### Objects and methods of research

The object of research was a calcined sorbent based on the ashes of the Novocherkassk State District Power Plant, accumulated at the ash dump according to the hydraulic ash removal scheme; subject of research – sorption capacity, treatment efficiency, adsorption equilibrium, sorption kinetics; research methods – spectrophotometric analysis.

The air-dry ASW sample was placed in a laboratory muffle furnace LOIP LF-5/11-G1 with a TS87B control module (Russia) and kept for 30 minutes at a temperature of 600 °C. Temperature control was carried out using a digital small-sized thermometer TCM 9410/M1 (Russia). At the end of the holding time, the resulting calcined sorbent was cooled in air at room temperature. To study the sorption properties of the calcined sorbent, a 2 g sample of it was placed in model aqueous mixtures with different initial contents of ammonium ions with a volume of 50 mL in conical flasks with a capacity of 100 mL. Magnetic cylindrical stirrers were placed in the flasks, installed on a magnetic stirrer MM 2A

(Czech Republic) and the mixture was stirred for a certain time at a rotation speed of the stirring device of 200 rpm. Then the solutions were removed from the stirrer and filtered through a “blue ribbon” ashless paper filter (Russia) installed in a glass funnel. In the resulting filtrate, the mass concentration of ammonium ions was determined by the spectrophotometric method by reaction with Nessler’s reagent with the formation of a colored compound at a wavelength of radiation passing through the solution of 425 nm. The content of ammonium ions was calculated using a pre-established calibration dependence on the optical density of solutions. Optical density measurements were carried out using a PE-5300VI spectrophotometer (Russia).

The content of ammonium ions in solutions  $X$ , mg/L, was determined by the expression:

$$X = \frac{C \cdot 50}{V}, \quad (1)$$

where  $C$  is the content of ammonium ions, found from a previously constructed calibration characteristic, mg/L;  $V$  – volume of a solution aliquot taken for analysis, mL; 50 – volume of the analyzed solution, mL;

$$C = \frac{D + 0.00233}{0.64269}, \quad (2)$$

where  $D$  is the optical density according to the spectrophotometer.

The sorption capacity (adsorption value) of the calcined sorbent  $A$ , mg/g, with respect to ammonium ions was calculated using the equation taking into account the pore volume of the sorbent:

$$A = \frac{C_0V - [C(V - v_p m)]}{m} = \frac{(C_0 - C)V}{m} + Cv_p, \quad (3)$$

where  $C_0$  is the initial concentration of ammonium ions in solution, mg/L;  $C$  is the current concentration of ammonium ions in the solution after sorption for a certain period of time, mg/L;  $V$  – volume of the initial solution ( $V = 0.05$  L);  $m$  – sorbent mass, g;  $v_p$  – specific pore volume of the calcined sorbent ( $v_p = 0.506 \cdot 10^{-3}$  L/g).

The extraction efficiency of ammonium ions  $E$ , %, was determined by the ratio of the amount of ammonium ions absorbed by the sorbent to the amount of ammonium ions in the original solution, expressed as a percentage:

$$E = \frac{C_0V - (V - v_p m)C}{C_0V} \cdot 100 = \left( \frac{C_0 - C}{C_0} + \frac{v_p m C}{C_0 V} \right) \cdot 100. \quad (4)$$

The phase equilibrium constant  $K_e$ , L/g, was calculated as the ratio of the equilibrium adsorption value  $A_e$ , mg/g, to the equilibrium concentration of ammonium ions  $C_e$  in the solution, mg/L:

$$K_e = \frac{A_e}{C_e}. \quad (5)$$

## Results and discussion

**The influence of the initial concentration of ammonium ions in solution on the amount of adsorption and treatment efficiency.** 7 model solutions each containing ammonium ions of 5, 20, 50 and 100 mg/L were prepared. The sorption capacity of the sorbent was studied with a dose of 2 g per 50 mL of model solution, the rotation speed of the mixing device was 200 rpm, pH = 7, and the sorption time was 10 to 180 min. The research results are shown in Table 1.

Figure 1 shows the dependences of the treatment efficiency  $E$ , %, of water from ammonium ions on the sorption duration  $\tau$ , min, at various initial values of ammonium ion concentrations in the solution  $C_0$ , in mg/L: 5, 20, 50 and 100. The highest efficiency  $E = 60\%$  was obtained for  $C_0 = 20$  mg/L.

From Figure 1 it follows that the efficiency of water treatment from ammonium ions reaches its maximum value with a sorption duration of 180 minutes.

**Kinetic models of adsorption.** We have processed the experimental data on the basis of two-parameter kinetic models of adsorption, widely used in the study of sorption by modified sorbents [9, 21, 22]:

– pseudo-first-order (Lagergren):

$$A_\tau = A_e(1 - e^{-k_1\tau}) \quad (6)$$

– pseudo-second-order (Ho and Mackay):

$$A_\tau = \frac{A_e^2 k_2 \tau}{A_e k_2 \tau + 1} \quad (7)$$

– diffusion (Morris-Weber):

$$A_\tau = k_p \tau^{1/2} + C \quad (8)$$

where  $A_\tau$  is the value of sorption capacity at time  $\tau$ , mg/g;  $k_1, k_2$  – adsorption rate constants of the pseudo-first and pseudo-second-order models;  $k_p$  – diffusion rate constant;  $C$  – parameter associated with the thickness of the boundary layer, mg/g.

Linearization of equations (6)–(7) has the form:

$$\ln(A_e - A_\tau) = \ln A_e - k_1\tau \quad (9)$$

$$\frac{\tau}{A_\tau} = \frac{1}{k_2 A_e^2} + \frac{\tau}{A_e} \quad (10)$$

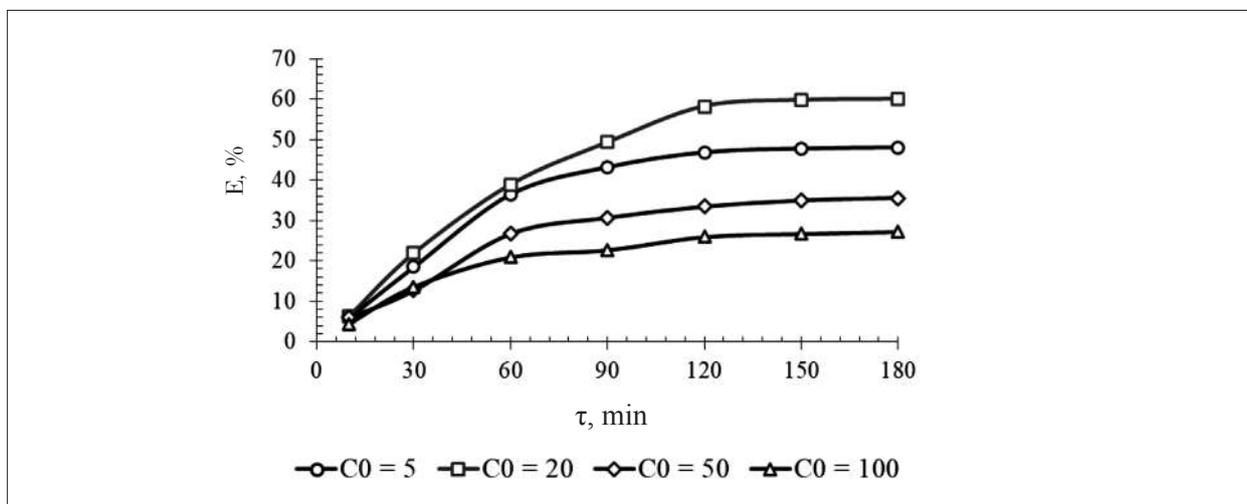
Tables 2–4 show the values of the parameters of equations (6)–(8), obtained by processing data for initial concentrations of ammonium ions in solution of 5, 20, 50 and 100 mg/L. The parameter  $A_e$  in the pseudo-first-order model is determined by the selection method until the value  $\ln A_e$  is reached, equal to that intercepted by a straight line on the ordinate plotted in coordinates  $\ln(A_e - A_\tau)$  from  $\tau$ . The relative error (discrepancy) is no more than 0.02%. A similar approach, called the trial and error method, is considered in [23].

The obtained coefficient of determination of the models  $R^2 > 0.9$  (Tables 1–3) indicates the

Table 1

The effect of the initial concentration of ammonium ions in the solution on the amount of adsorption and treatment efficiency

Contact time $\tau$ , min	Mass of sorbent $m$ , g	Solution optical density $D$	Aliquot of solution taken for analysis $V$ , mL	Concentration of ammonium ions in solution after sorption $C$ , mg/L	Treatment efficiency $E$ , %	Adsorption value $A$ , mg/g
Initial concentration of ammonium ions in solution 5 mg/L						
10	1,9999	0,306	5	4,797	5,992	0,0075
30	1,9993	0,265		4,160	18,492	0,0231
60	2,0010	0,206		3,242	36,482	0,0456
90	1,9981	0,184		2,899	43,188	0,0540
120	2,0005	0,172		2,713	46,848	0,0586
150	2,0002	0,169		2,666	47,763	0,0597
180	2,0009	0,168		2,650	48,068	0,0601
Initial concentration of ammonium ions in solution 20 mg/L						
10	1,9980	0,366	1,5	19,104	6,414	0,0321
30	1,9992	0,305		15,940	21,914	0,1096
60	1,9989	0,238		12,465	38,937	0,1948
90	1,9989	0,197		10,338	49,354	0,2469
120	2,0008	0,162		8,523	58,248	0,2911
150	1,9980	0,156		8,212	59,771	0,2992
180	2,0006	0,155		8,160	60,026	0,3000
Initial concentration of ammonium ions in solution 50 mg/L						
10	2,0007	0,306	0,5	47,975	5,993	0,0749
30	2,0018	0,284		44,552	12,701	0,1586
60	2,0013	0,238		37,394	26,726	0,3339
90	1,9984	0,225		35,372	30,687	0,3839
120	2,0010	0,216		33,971	33,433	0,4177
150	1,9997	0,211		33,193	34,957	0,4370
180	1,9987	0,209		32,882	35,566	0,4449
Initial concentration of ammonium ions in solution 100 mg/L						
10	2,0000	0,374	0,3	97,592	4,383	0,1096
30	2,0018	0,338		88,257	13,531	0,3380
60	1,9995	0,309		80,736	20,898	0,5226
90	1,9996	0,302		78,921	22,676	0,5670
120	2,0016	0,289		75,550	25,981	0,6490
150	2,0015	0,286		74,772	26,743	0,6681
180	2,0017	0,284		74,253	27,251	0,6807



**Fig. 1.** Dependence of treatment efficiency  $E$ , %, on sorption duration  $\tau$ , min, at various initial values of ammonium ion concentrations in solution  $C_0$ , mg/L (sorbent dose 2 g per 0.05 L of solution, pH 7,  $t = 25 \pm 2$  °C,  $v = 200$  rpm)

**Table 2**

Pseudo-first-order model constants

Initial concentration of ammonium ions in solution $C_0$ , mg/L	Equilibrium value of adsorption $A_e$ , mg/g	Adsorption rate constant $k_1$ , min <sup>-1</sup>	Determination coefficient $R^2$
5	0.0619	0.0214	0.9719
20	0.3255	0.0159	0.9610
50	0.4614	0.0192	0.9922
100	0.6967	0.0212	0.9917

**Table 3**

Pseudo-second-order model constants

Initial concentration of ammonium ions in solution $C_0$ , mg/L	Equilibrium value of adsorption $A_e$ , mg/g	Adsorption rate constant $k_2$ , g/(mg·min)	Determination coefficient $R^2$
5	0.0983	0.1088	0.9087
20	0.5605	0.0137	0.8922
50	0.6583	0.0202	0.9613
100	0.9344	0.0181	0.9774

**Table 4**

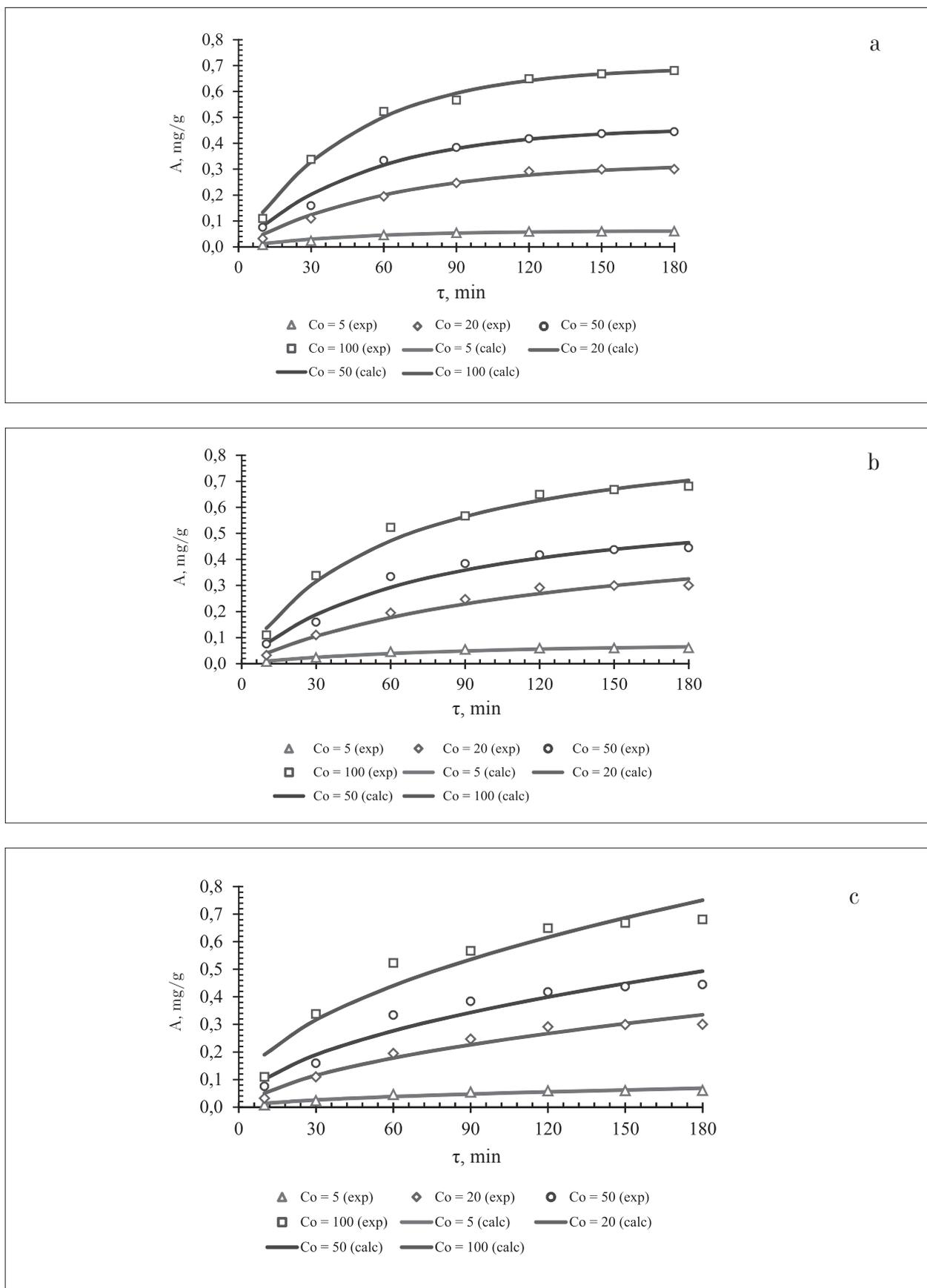
Intra-particle diffusion model constants

Initial concentration of ammonium ions in solution $C_0$ , mg/L	Adsorption rate constant $k_p$ , mg/(g·min <sup>1/2</sup> )	Parameter $C$ , mg/g	Determination coefficient $R^2$
5	0.0054	- 0.0038	0.9106
20	0.0277	- 0.0368	0.9556
50	0.0382	- 0.0194	0.9269
100	0.0547	+ 0.0168	0.9214

external diffusion mechanism of physical adsorption and the applicability of the considered kinetics models for describing the adsorption of ammonium ions by a calcined sorbent based on ASW. The pseudo-first-order (Lagergren)

model most adequately reflects the adsorption of ammonium ions.

Figure 2 shows the experimental data and calculated values of the adsorption value  $A$ , mg/g, from the sorption duration  $\tau$ , min, cor-



**Fig. 2.** Dependence of the adsorption value on the contact time at different values of the initial concentration of ammonium ions in the solution (sorbent dose 2 g per 0.05 L of solution, pH 7,  $t = 25 \pm 2$  °C,  $v = 200$  rpm): a) pseudo-first-order model; b) pseudo-second-order model; c) intra-particle diffusion

Table 5

Study of adsorption equilibrium in the system ammonium ions – calcined sorbent

Initial concentration of ammonium ions in solution $C_0$ , mg/L	Mass of sorbent $m$ , g	Solution optical density $D$	Aliquot of solution taken for analysis $V$ , mL	Equilibrium concentration of ammonium ions in solution after sorption of $C_e$ , mg/L	Treatment efficiency $E$ , %	Equilibrium value of adsorption $A_e$ , mg/g	Phase equilibrium constant, $K_e$ , L/g
5	2.0009	0.168	5	2.650	48.068	0.0601	0.0227
20	2.0006	0.155	1.5	8.160	60.026	0.3000	0.0368
30	2.0057	0.201	1.0	15.819	48.341	0.3615	0.0229
50	1.9987	0.209	0.5	32.882	35.566	0.4449	0.0135
100	2.0017	0.284	0.3	74.253	27.251	0.6807	0.0092
200	2.0009	0.215	0.1	169.078	17.173	0.8583	0.0051
300	1.9987	0.169	0.05	266.583	12.936	0.9709	0.0036

Note: Sorption duration 180 min, magnetic stirrer speed 200 rpm, pH 7, temperature  $25 \pm 2$  °C.

responding to the initial concentration of ammonium ions, in mg/L: 5, 20, 50, 100 according to the pseudo-first, pseudo-second-order and diffusion models.

With an increase in the concentration of ammonium ions in the initial solution  $C_0$ , the adsorption value  $A$  increases and tends to the maximum value at a contact time of 150–180 min.

In equation (8), parameter  $C$  is a segment cut off on the ordinate axis by a straight line in coordinates  $A_t = f(\tau^{1/2})$ . This dependence, constructed using experimental points, has the greatest deviation from a straight line compared to the location of experimental points and straight lines constructed using equations (9) and (10). On the one hand, this explains the deviation of the experimental points from the calculated curve in Figure 2 c), the coefficients of which were found by the linearization method, on the other hand, it confirms the assumption about the limiting stage of the external diffusion mechanism.

In real household wastewater, the concentration of ammonium ions reaches about 20 mg/L. In this case, the maximum value of adsorption will be about 0.325 mg of ammonium ions per 2 g of calcined sorbent according to the pseudo-first-order model, which has the largest average value of the coefficient of determination.

**Study of adsorption equilibrium in the system of ammonium ions – calcined sorbent.**

An additional series of solutions containing ammonium ions of 30, 200 and 300 mg/L were prepared. 2.0 g of calcined sorbent was placed in a container with a model solution with a volume of 50 mL. The container was placed on a magnetic stirrer. The solution was stirred for 180 minutes at pH=7 at a stirring speed of 200 rpm. The ad-

sorption equilibrium results are shown in Table 5, including the equilibrium data in Table 1.

Analyzing the data in Table 5, it can be noted that with adsorption equilibrium in the system of ammonium ions – calcined sorbent, the cleaning efficiency and phase equilibrium constant increase with an increase in the initial concentration of ammonium ions in the solution and reach a maximum at an initial concentration of ammonium ions of about 20 mg/L and then decrease.

We will process the experimental data on adsorption equilibrium on the basis of two-parameter adsorption isotherms [24, 25], relating the equilibrium adsorption value (sorption capacity)  $A_e$ , mg/g, with the equilibrium concentration of ammonium ions in the solution  $C_e$  after sorption, mg/L:

– Langmuir

$$A_e = A_{\max} \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e}; \tag{11}$$

– Freundlich

$$A_e = K_F C_e^{1/n}; \tag{12}$$

– Temkin

$$A_e = \frac{RT}{B_T} \ln(K_T C_e). \tag{13}$$

We determine the coefficients using the linearization method:

– Langmuir isotherms

$$\frac{C_e}{A_e} = \frac{C_e}{A_{\max}} + \frac{1}{K_L A_{\max}}; \tag{14}$$

– Freundlich isotherms

$$\ln A_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_e; \quad (15)$$

– Temkin isotherms

$$A_e = \frac{RT}{B_T} \ln K_T + \frac{RT}{B_T} \ln C_e, \quad (16)$$

where  $A_{max}$ ,  $K_L$  are Langmuir constants;  $K_F$ ,  $n$  – Freundlich constants;  $B_T$ ,  $K_T$  – Temkin constants;  $R = 8.314$  – universal gas constant, J/(g·K);  $T$  – temperature, K.

The Langmuir model is used to describe adsorption on a monomolecular layer. The  $A_{max}$  value shows the maximum (limiting) value of the adsorption value at the initial concentration of ammonium ions in the solution  $C_0$ , and the  $K_L$  constant is called the Langmuir adsorption equilibrium constant.

The Freundlich model characterizes unlimited adsorption on heterogeneous surfaces in several layers. The  $K_L$  constant is called the Freundlich adsorption equilibrium constant. The constant  $n$  (or  $1/n$  – heterogeneity coefficient) shows the intensity of interaction between the adsorbent and ammonium ions at equilibrium.

The logarithmic Temkin adsorption isotherm was obtained taking into account the heterogeneity of the surface, which distinguishes it from the Langmuir isotherm, which describes adsorption on a homogeneous surface. Adsorption is monomolecular in nature.

Adsorption isotherm constants are given in Table 6.

The value of the coefficient of determination according to the Langmuir isotherm is the largest ( $R^2 = 0.9904$ ). A comparison of experimental data and calculated adsorption isotherm curves (Figure 3) shows that the best description is achieved using the Langmuir model. It can be concluded that the adsorption of ammonium ions on a calcined sorbent based on ASW of thermal power engineering corresponds to the theory of monomolecular adsorption.

The relationship between the initial  $C_0$  and equilibrium  $C_e$  concentrations of ammonium ions is almost a straight line with the coefficient of determination  $R^2 = 0.9977$ , when described by a quadratic dependence  $R^2 = 0.9994$ . A slight deviation from linearity is observed at small  $C_0$ . However, at low initial concentrations of ammonium ions in the  $C_0$  solution, the calculated

Table 6

Langmuir, Freundlich, and Temkin isotherm constants

Langmuir isotherm			Freundlich isotherm			Temkin isotherm		
$A_{max}$ , mg/g	$K_L$ , L/mg	$R^2$	$n$	$K_F$	$R^2$	$B_T$	$K_T$	$R^2$
1,0864	0,02624	0,9904	1,8823	0,06304	0,87255	12769,67	0,462	0,9822

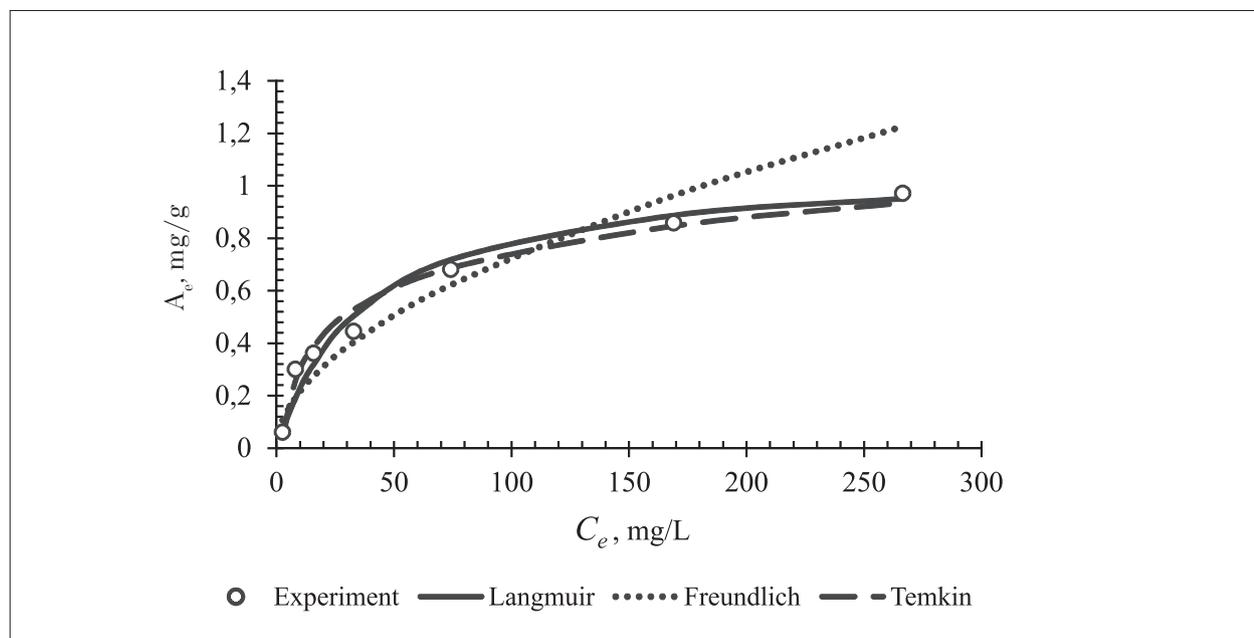
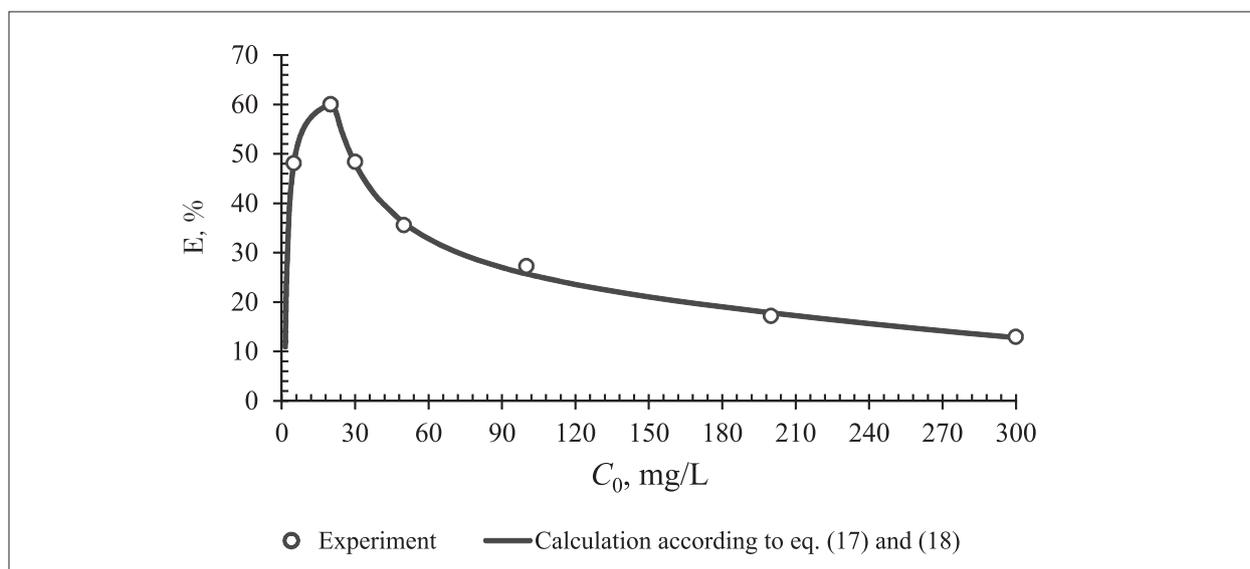


Fig. 3. Langmuir, Freundlich, and Temkin isotherms



**Fig. 4.** Influence of the initial concentration of ammonium ions in the solution on the efficiency of water treatment from ammonium ions by a calcined sorbent (sorbent dose 2 g per 0.05 L of solution, pH 7,  $t = 25 \pm 2$  °C,  $\tau = 180$  min,  $v = 200$  rpm)

values of the equilibrium efficiency of water treatment from ammonium ions significantly exceed the experimental ones. The graphical shape of the efficiency curve is decreasing and does not have an extremum point. In this regard, we proposed to describe the relationship between the equilibrium  $C_e$  and initial  $C_0$  concentrations of ammonium ions in solution by two approximating curves: for initial concentrations of ammonium ions from 0 to 20 mg/L – a linear dependence (equation (17)), above 20 mg/L – quadratic dependence (equation (18)).

$$C_e = 0.36733 \cdot C_0 + 0.81333; \quad (17)$$

$$C_e = 0.00037 \cdot C_0^2 + 0.80857 \cdot C_0 - 8.69258. \quad (18)$$

Figure 4 shows a comparison of calculated and experimental efficiency values at adsorption equilibrium. The efficiency was calculated using equation (4), where  $C = C_e$ . Analysis of the results shown in Figure 4 shows that a calcined sorbent based on ash-and-slag waste from thermal power engineering is most effective for removing ammonium ions from water at initial concentrations from 5 to 30 mg/L. Such values of ammonium ion concentrations are typical for domestic wastewater.

With an increase in the initial concentration of ammonium ions in the  $C_0$  solution, the efficiency of treatment  $E$  at low concentrations of  $C_0$  increases, and with an increase in the concentration of  $C_0$  it decreases.

## Conclusion

Based on the results of the research, we can conclude that the calcined sorbent based on ash-and-slag waste from thermal power engineering is applicable for the treatment of household wastewater from ammonium ions. The pseudo-first order kinetics model best describes the experimental data on the sorption of ammonium ions from water for all initial ammonium ion concentrations of 5, 20, 50 and 100 mg/L. Among the two-parameter adsorption isotherms, the best description is obtained using the Langmuir isotherm.

*The research is carried out with the financial support of the Kuban Science Foundation in the framework of the scientific project MFI-20.1/57.*

## References

1. Ashikhmina T.Ya., Skugoreva S.G., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Assessment of the state of surface water bodies in the area of the landfill for the disposal of pesticides // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 104–111 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-104-111
2. Korotkova T.G., Zakolyukina A.M., Bushumov S.A., Burlaka S.D. The study of water quality of river flowing within the city using quantitative chemical and microbiological analyses // *Pollution Research*. 2019. V. 38. No. 1. P. 228–233.
3. Gupta V.K., Sadegh H., Yari M., Shahryari Ghosheh-Andi R., B. Maazinejad B., Chahardor M. Removal of ammonium ions from wastewater. A short review in development of efficient methods // *Global Journal of Environmental Science*

and Management (GJESM). 2015. No. 1 (2). P. 149–158. doi: 10.7508/gjesm.2015.02.007

4. Lebedynets M., Sprynskyy M., Sakhnyuk I., Zbytyniewski R., Golembiewski R., Buszewski B. Adsorption of Ammonium Ions onto a Natural Zeolite: Transcarpathian Clinoptilolite // *Adsorption Science & Technology*. 2004. V. 22. No. 9. P. 731–741. doi: 10.1260/0263617043026541

5. Karadag D., Koc Y., Turan M., Armagan B. Removal of ammonium ion from aqueous solution using natural Turkish clinoptilolite // *Journal of Hazardous Materials*. 2006. V. 136. No. 3. P. 604–609. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.12.042

6. Mažeikiene A., Valentukevičiene M., Rimeika M., Matuzevičius A.B., Daukyns R. Removal of nitrates and ammonium ions from water using natural sorbent zeolite (clinoptilolite) // *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2008. V. 16. No. 1. P. 38–44. doi: 10.3846/1648-6897.2008.16.38-44

7. Tilaki R.A.D. Removal of ammonium ions from water by raw and alkali activated bentonite // ICAMS 2012 – 4th International Conference on Advanced Materials and Systems [Internet resource] [https://icams.ro/icamsresurse/2012/proceedings/IV\\_Environment\\_02.pdf](https://icams.ro/icamsresurse/2012/proceedings/IV_Environment_02.pdf) (Accessed: 25.10.2023).

8. Leszczyński J. Removal of ammonium ions from aqueous solutions using weathered halloysite // *Materials*. 2021. V. 14. Article No. 4359. doi: 10.3390/ma14164359

9. Runtti H., Sundhararasu E., Pesonen J., Tuomikoski S., Hu T., Lassi U., Kangas T. Removal of ammonium ions from aqueous solutions using alkali-activated analcime as sorbent // *ChemEngineering*. 2023. V. 7. Article No. 5. doi: 10.3390/chemengineering7010005

10. Kondrashova A.V., Kuzmina R.I. Treatment of wastewater from ammonium ions using the adsorption method // *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2022. No. 5 (131). P. 135–138 (in Russian).

11. Boopathy R., Karthikeyan S., Mandal A. B., Sekaran G. Adsorption of ammonium ion by coconut shell-activated carbon from aqueous solution: kinetic, isotherm, and thermodynamic studies // *Environmental Science and Pollution Research*. 2012. V. 20. No. 1. P. 533–542. doi: 10.1007/s11356-012-0911-3

12. Ghising R.B., Jha V.K. Characteristics of the ammonium ion adsorption from wastewater by the activated carbon obtained from waste tire // *Journal of Nepal Chemical Society*. 2022. V. 43. No. 1. P. 17–27. doi: 10.3126/jncs.v43i1.46998

13. Vaičiukynienė D., Mikelionienė A., Baltušnikas A., Kantautas A., Radzevičius A. Removal of ammonium ion from aqueous solutions by using unmodified and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-modified zeolitic waste // *Scientific Reports*. 2020. V. 10. Article No. 352. doi: 10.1038/s41598-019-55906-0

14. Zhang B., Wu D., Wang C., He S., Zhang Z., Kong H. Simultaneous removal of ammonium and phosphate by zeolite synthesized from coal fly ash as influenced by acid treatment // *Journal of Environmental Sciences*. 2007. V. 19. No. 5. P. 540–545. doi: 10.1016/s1001-0742(07)60090-4

15. Zhang M., Zhang H., Xu D., Han L., Niu D., Zhang L., Wu W., Tian B. Ammonium removal from aqueous solution

by zeolites synthesized from low-calcium and high-calcium fly ashes // *Desalination*. 2011. V. 277. No. 1–3. P. 46–53. doi: 10.1016/j.desal.2011.03.085

16. Affandi K.A., Bagastyo A.Y., Fitriana A.R. Removal of ammonium and phosphate in the synthetic wastewater using coal fly ash adsorbent // *Journal of Environment and Sustainability*. 2021. V. 5. No. 1. P. 25–34. doi: 10.22515/sustinere.jes.v5i1.129

17. Juan R., Hernandez S., Andrés J.M., Ruiz C. Ion exchange uptake of ammonium in wastewater from a Sewage Treatment Plant by zeolitic materials from fly ash // *Journal of Hazardous Materials*. 2009. V. 161. P. 781–786. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.04.025

18. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Method for producing sorbent for treating wastewater from petroleum products // Patent RU 2708604. Application: 2019120574, 01.07.2019. Date of publication: 09.12.2019. Bull. 34. (in Russian).

19. Bushumov S.A., Korotkova T.G. Determination of physical and chemical properties of the modified sorbent from ash-and-slag waste accumulated on ash dumps by hydraulic ash removal // *RASĀYAN Journal of Chemistry*. 2020. V. 13. No. 3. P. 1619–1626. doi: 10.31788/RJC.2020.1335454

20. Korotkova T.G., Bushumov S.A. Kinetic curves of oil products sorption by calcined sorbent from ash and slag wastes of thermal power engineering // *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023. V. 13. No. 1. P. 142–151 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2023-13-1-142-151

21. Ji X.D., Zhang M.L., Ke Y.Y., Song Y.C. Simultaneous immobilization of ammonium and phosphate from aqueous solution using zeolites synthesized from fly ashes // *Water Science & Technology*. 2013. V. 67. No. 6. P. 1324–1331. doi: 10.2166/wst.2013.690

22. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Evaluation of the efficiency of sorption of lead(II) ions using models of sorption kinetics and isotherms // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 44–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-044-051

23. Krizhanovskaya O.O., Sinyaeva L.A., Karpov S.I., Selemenev V.F., Borodina E.V., Ressen F. Kinetic models for describing the sorption of fat-soluble physiologically active substances by highly ordered inorganic silicon-containing materials // *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2014. V. 14. No. 5. P. 784–794 (in Russian).

24. Benmessaoud A., Nibou D., Mekatel El Hadj, Amokrane S. A comparative study of the linear and non-linear methods for determination of the optimum equilibrium isotherm for adsorption of Pb<sup>2+</sup> ions onto Algerian treated clay // *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2020. V. 39. No. 4. P. 153–171. doi: 10.30492/ijcce.2019.35116

25. Wang J., Guo X. Adsorption kinetic models: physical meanings, applications, and solving method // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. V. 390. Article No. 122156. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122156

## Использование отходов производств для сорбции токсичных газов

© 2023. С. Л. Фукс, к. т. н., доцент,  
С. В. Девятерикова, к. т. н., доцент,  
Вятский государственный университет,  
610000, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: usr01730@vyatsu.ru

Перспективной и актуальной в охране окружающей среды является очистка отходящих газов одних производств твёрдыми отходами других предприятий. В данной работе приведены результаты исследований очистки отходящих газов от аммиака и бензола отходами теплоэнергетики (зола уноса) и химической промышленности (вторичный политетрафторэтилен).

В результате деятельности предприятий теплоэнергетики, работающих на каменном угле, образуется зола уноса, требующая размещения на золошлакоотвалах. Золошлакоотвалы занимают большие площади и значительно нагружают местную экосистему. Уменьшение объёмов золоотвалов возможно за счёт использования золы в производстве строительных, звукопоглощающих и термоизоляционных материалов. Зола уноса можно применять как основу для гетерогенных катализаторов. Также зола уноса используется для производства цеолитов и в качестве добавки для улучшения структуры почв. В ряде исследований приведены положительные результаты очистки сточных вод от нефтепродуктов и ионов тяжёлых металлов, а также поглощения оксида серы (IV) из атмосферного воздуха.

В нашей работе предложено использовать золу уноса в качестве сорбента для извлечения аммиака, содержащегося в отходящих газах производств азотной кислоты и азотных удобрений. Адсорбат может быть применён в качестве удобрения для кислых почв.

Побочным продуктом производства политетрафторэтилена является вторичный политетрафторэтилен. Методом исчерпывающего фторирования возможно преобразование его в ультрадисперсный порошок с размерами частиц 0,20–1,35 мкм. Нанесение его на пористый материал позволит получить сорбент, который можно использовать для извлечения паров бензола из отходящих газов производств, использующих бензол, например, в качестве растворителя. В исследовании показано, что разработанный сорбент эффективно очищает отходящие газы от паров бензола по сравнению с активированным углём. Исследования очистки нагретых газов показали, что с увеличением времени очистки эффективность падает практически до нуля, что, предположительно, обусловлено конденсацией жидкой фракции бензола на поверхности сорбента.

**Ключевые слова:** зола уноса, политетрафторэтилен, активированный уголь, адсорбция, аммиак, бензол.

## Utilization of industrial wastes for sorption of toxic gases

© 2023. S. L. Fuks ORCID: 0000-0002-9238-2944\*  
S. V. Devyaterikova ORCID: 0000-0003-1863-1209\*  
Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: usr01730@vyatsu.ru

The purification of exhaust gases of some industries by solid wastes of other enterprises is promising and up-to-date in environmental protection. This paper presents the research results on purification of waste gases from ammonia and benzene by wastes from thermal power engineering (fly ash) and chemical industry (secondary polytetrafluoroethylene).

Operation of heat power industry plants, which are powered by bituminous coal, results in producing fly ash which is to be stored in special ash ponds. Ash ponds occupy large areas and significantly burden the local ecosystem. Using ash in building, sound-absorbing, and heat insulating materials' production reduces the volumes of ash ponds. Fly ash can be used as a base for heterogeneous catalysts. Fly ash can also be used in zeolite production and for soil structure improvement. A number of studies provide positive results of wastewater treatment from oil products and heavy metal ions, as well as absorption of air sulfur (IV) oxide.

We propose fly ash using as a sorbent for ammonia adsorbing from exhaust gases in nitric acid and nitrogen fertilizers production. The adsorbate can be applied as a fertilizer for acid soils.

Secondary polytetrafluoroethylene is a co-product of polytetrafluoroethylene production. It can be converted into ultradisperse powder with particle sizes of 0.20–1.35 μm by method of exhaustive fluoridation; the powder applies to a sponge material. The resulting sorbent can be used to extract benzene vapors from the exhaust gases of industries using

benzene, for example, as a solvent. Compared to activated carbon, the developed sorbent effectively removes benzene vapors from exhaust gases. Over time, the purification efficiency of heated gases decreases to almost zero. Presumably this is due to liquid benzene fraction condensation on the sorbent surface.

**Keywords:** fly ash, polytetrafluoroethylene, activated carbon, adsorption, ammonia, benzene.

Перспективной и актуальной в охране окружающей среды является очистка отходящих газов одних производств твёрдыми отходами других предприятий. В работе приведены результаты исследований очистки отходящих газов от аммиака и бензола отходами теплоэнергетики (зола уноса) и химической промышленности (вторичный политетрафторэтилен).

В химическом производстве в результате синтеза политетрафторэтилена (ПТФЭ) на внутренней поверхности реактора образуется вторичный ПТФЭ. Для его переработки применяются способы термической деструкции в присутствии водяного пара, а также обработка высшими фторидами переходных металлов. Разработана технология получения ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) методом исчерпывающего фторирования с использованием в качестве носителя фтора трифторида кобальта [1].

Целью исследования являлось определение эффективности поглощения паров аммиака и бензола золой уноса и ультрадисперсным политетрафторэтиленом (УПТФЭ), полученным методом исчерпывающего фторирования с использованием в качестве носителя фтора трифторида кобальта.

### Объекты и методы исследований

Объекты исследования: ультрадисперсный ПТФЭ, зола уноса теплоэлектростанции, активированный уголь марки БАУ-А, пары аммиака и бензола.

Аммиак находится в отходящих газах производств азотной кислоты, азотных удобрений [2].

Бензол широко используется в качестве растворителя и в производстве синтетических каучуков, волокон, красителей, поверхностно-активных веществ, инсектицидов, лекарственных веществ и содержится в отходящих газах данных производств [3–4].

Зола уноса накоплена на золошлакоотвалах теплоэлектростанций, использующих уголь. Это приводит к высокой нагрузке на окружающую среду. Одним из способов ликвидации золошлаковых отходов является переработка золы и шлака. Несмотря на это

уровень использования золы и шлака в России составляет не более 4% [5].

Наиболее эффективным является уменьшение объёмов золоотвалов за счёт получения строительных материалов (цемента, полимерцемента, бетонных и асфальтобетонных смесей, геополимерных вяжущих [6–12]). Значительно расширить спектр использования золы позволяют современные технологии строительства при формировании изделий 3D-принтером [13]. Исследования показали, что золу уноса можно также использовать как основу для гетерогенных катализаторов [14, 15]. Разработан метод изготовления звукопоглощающих и термоизоляционных материалов [16–18]. Также зола уноса используется для производства цеолитов и в качестве добавки для улучшения структуры почв [19]. В исследованиях [20–22] приведены положительные результаты очистки сточных вод от нефтепродуктов, ионов тяжёлых металлов: хрома, никеля, меди, свинца, кадмия и цинка. В работах [18, 23] показано, что зола уноса в силу высокоразвитой пористости способна поглощать оксид серы(IV) из атмосферного воздуха.

Для исследования морфологии частиц золы уноса и порошка УПТФЭ применяли сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) марки JEOL JSM-6510 LV. Для изучения качественного и количественного состава химических элементов использовали датчик энергодисперсионного рентгеновского анализа Oxford, встроенного в СЭМ. Изображение морфологии поверхности на СЭМ получали с помощью программного пакета Sem main me. Для шести выбранных частиц золы уноса определяли рентгеновский спектр, указывающий на элементный качественный и количественный состав. Результаты шести экспериментов усреднялись.

Процесс деструкции отходов политетрафторэтилена осуществляли при нагреве в интервале температур 430–500 °С в присутствии переносчика фтора –  $\text{CoF}_3$  [24].

Для получения количественных характеристик адсорбции аммиака или бензола проводили серию опытов по пропусканию воздушной смеси через колонки с адсорбентом. Условиями являлись постоянная температура,

время, объёмный расход и масса адсорбента. В качестве адсорбентов использовали активированный уголь марки БАУ-А, синтетический мелкопористый силикагель – носитель УПТФЭ и золу уноса. Заданную концентрацию примеси бензола и аммиака в воздухе создавали путём введения их в специальную ёмкость, встроенную в установку с определённым объёмным расходом (2 л/мин). Для адсорбции газов из полученной смеси устанавливали колонки, заполненные сорбентами в количестве 35 г. На выходе из колонки непоглощённый сорбентами аммиак реагировал с раствором соляной кислоты. По изменению концентрации кислоты определялся остаток аммиака в воздухе. Концентрацию бензола в смеси определяли с помощью газоанализатора «КОЛИОН» на входе в колонку и выходе из неё. Эффективность очистки воздуха от аммиака и бензола рассчитывали по формуле:

$$I = \frac{c_0 - c_1}{c_0} \cdot 100\%,$$

где  $c_0$  – концентрация аммиака или бензола до колонки, мг/м<sup>3</sup>;  $c_1$  – концентрация бензола после колонки, мг/м<sup>3</sup>.

Проведённые многократные исследования гранулометрического состава золы уноса для различных целей, выполненные виброрассевом ВР-1, показали погрешность измерений ±5%.

### Результаты и обсуждение

В золе уноса присутствуют несгоревшие частицы угля в виде кокса, микросферы различного размера, состава, свойств и формы, в том числе полые ценосферы, а также частички кварцевого песка и агломераты сложного состава. Средний размер частиц золы составляет 132±3 мкм. Гранулометрический состав, определяемый с помощью виброрассева марки ВР-1, приведён в таблице 1.

Морфология частиц золы уноса и УПТФЭ, полученного в результате термодеструкции отходов политетрафторэтилена методом исчерпывающего фторирования, представлена на рисунке 1.

Пористые частицы золы уноса, образующиеся в процессе охлаждения расплава шлака, имеют неправильную сферическую форму. Минимальное и максимальное содержание элементов в золе уноса приведено в таблице 2.

Таблица 1 / Table 1

Гранулометрический состав золы уноса (100 г)  
Fly ash granulometric composition (100 g)

Размер частиц, мкм / Particle size, μm		Масса частиц, г Particle weight, g
минимум / minimum	максимум / maximum	
450	1200	2,23
315	450	2,08
125	315	52,69
90	125	36,06
< 90		6,94

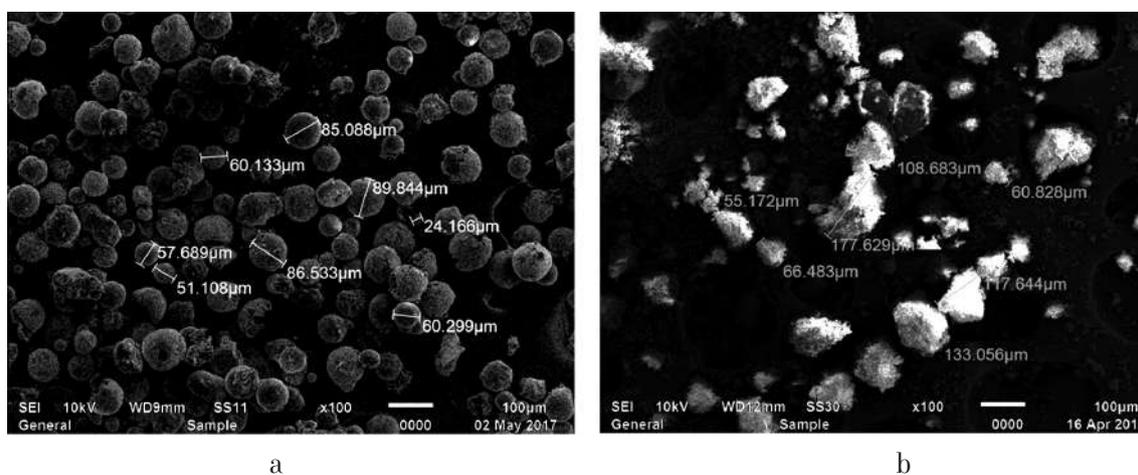


Рис. 1. Морфология частицы золы уноса (а) и УПТФЭ (б). 100×  
Fig. 1. Fly ash (a) and ultradisperse polytetrafluoroethylene (b) particle morphology. 100×

Таблица 2 / Table 2

Элементный состав золы уноса (вес. %) / Fly ash elementary composition (weight. %)

Элемент / Element	Минимум / minimum	Максимум / maximum	Элемент / Element	Минимум / minimum	Максимум / maximum
C	6,39	24,71	K	0,88	1,49
O	41,95	52,15	Ca	0,39	3,17
Na	0,79	1,48	Ti	0,31	2,39
Mg	0,32	0,99	Fe	1,21	8,28
Al	7,30	11,86	Zr	1,59	2,92
Si	13,62	23,30			

Таблица 3 / Table 3

Элементный состав порошка УПТФЭ [25] / Ultradisperse polytetrafluoroethylene (UPTFE) powder elementary composition [25]

Элемент / Element	Весовой состав, % / Weight composition, %		Среднее значение, % / Mean value, %
	минимум / minimum	максимум / maximum	
C	21,22	32,98	27,10
O	28,85	46,18	37,51
F	32,60	38,17	35,39

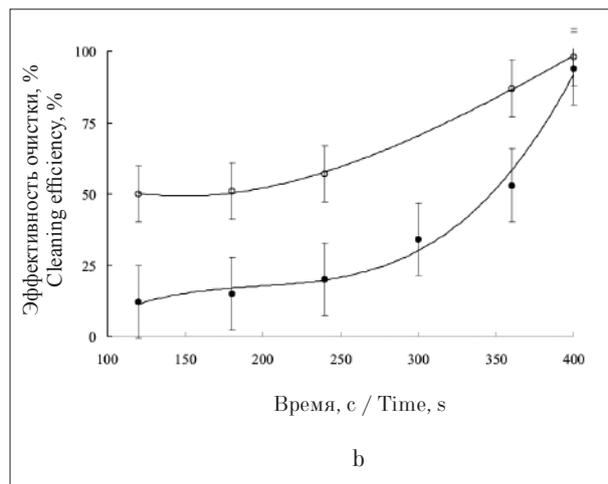
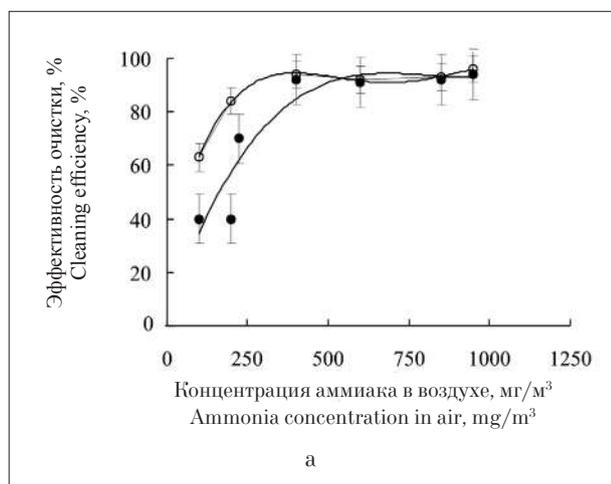


Рис. 2. Зависимость эффективности очистки воздуха от концентрации аммиака (a) и от времени адсорбции (b) золой уноса (○) и активированным углём (●). Температура 20 °C / Fig. 2. Dependence of air purification efficiency on ammonia concentration (a) and on adsorption time (b) with fly ash (○) and activated carbon (●). The temperature is 20 °C

В таблице 3 приведён состав УПТФЭ.

Из таблицы 3 видно, что частицы УПТФЭ содержат элементы, количество которых возрастает в ряду C → F → O. Результаты эффективности сорбентов по отношению к аммиаку представлены на рисунке 2.

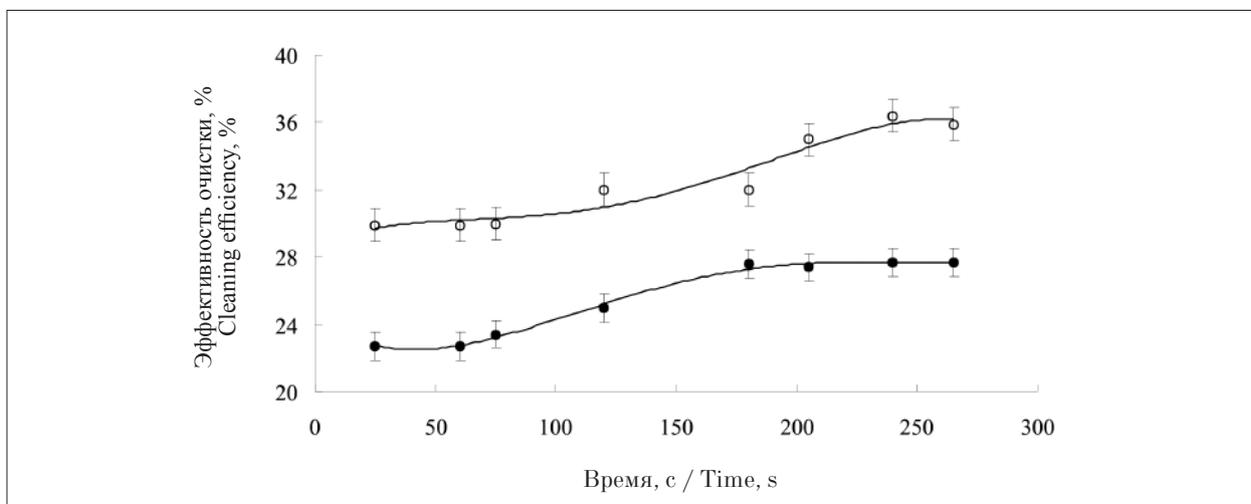
При увеличении концентрации аммиака в воздухе и времени эффективность сорбентов возрастает независимо от их природы. Однако активированный уголь очищает воздух лучше золы уноса при одинаковой массе поглотителя. Для повышения эффективности очистки золой уноса необходимо увеличить её массу в адсорбере.

Результаты эффективности сорбентов по отношению к парам бензола приведены на рисунке 3.

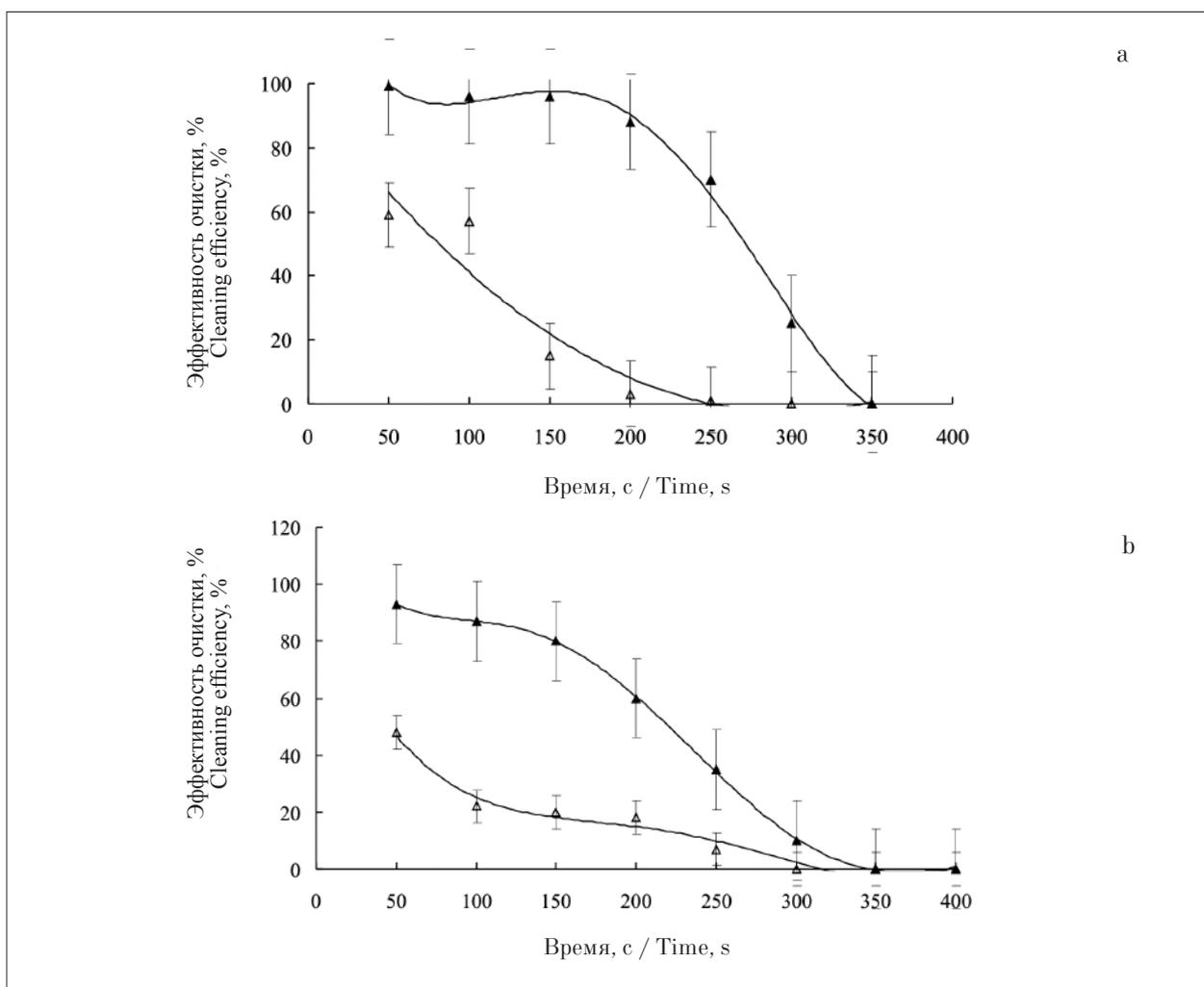
Из приведённых результатов следует, что с течением времени эффективность сорбентов возрастает, причём силикагель, модифицированный УПТФЭ, показал лучшие результаты.

Результаты исследования влияния температуры паров бензола на сорбцию приведены на рисунке 4.

Показано, что пары бензола поглощаются с большим эффектом силикагелем, модифицированным УПТФЭ, независимо от их температуры. С увеличением времени очистки нагрет-



**Рис. 3.** Зависимость эффективности очистки от времени адсорбции силикагелем (●) и силикагелем, модифицированным УПТФЭ (○). Температура 20 °С  
**Fig. 3.** Dependence of purification efficiency on adsorption time with silica gel (●) and with silica gel modified with UPTFE (○). The temperature is 20 °C



**Рис. 4.** Зависимость эффективности очистки воздуха от паров бензола от времени адсорбции силикагелем (Δ) и силикагелем, модифицированным УПТФЭ (▲) при различных температурах (а – 50 °С, б – 150 °С)  
**Fig. 4.** Dependence of air purification efficiency from benzene vapors on adsorption time with silica gel (Δ) and with silica gel modified with UPTFE (▲) at different temperatures (a – 50 °C, b – 150 °C)

тых газов эффективность падает практически до нуля, что, предположительно, обусловлено конденсацией жидкой фракции бензола на поверхности сорбента.

Следовательно, при адсорбции бензола силикагелем, модифицированным УПТФЭ, очистку воздуха необходимо проводить при температуре 20 °С.

### Заключение

Определён элементный состав исследуемой золы и порошка УПТФЭ. Установлено, что зола уноса способна поглощать аммиак из воздуха. При этом зола уноса обладает несколько худшими показателями адсорбции, чем активированный уголь при одинаковом количестве в адсорбере. При увеличении массы сорбента эффективность, предположительно, будет возрастать. Преимущества использования золы уноса заключаются в возможности применять золу уноса с адсорбированным аммиаком в качестве азотсодержащего удобрения.

Результаты исследований по очистке воздуха от паров бензола показали, что применение сорбента «силикагель – частицы УПТФЭ» наиболее эффективно при низких температурах.

### Литература

1. Fuks S.L., Khitrin S.V., Vologzhanina Yu.V., Pinaeva L.N., Mikhailsyna Yu.S., Devyaterikova S.V. Closed cycle of production of ultrafine polytetrafluoroethylene and new areas of use of fluoropolymer manufacture waste // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2015. V. 88. No. 11. P. 1800–1807.
2. Гольдинов А.Л. Комплексная азотнокислотная переработка фосфатного сырья. Л.: Изд-во Химия, 1982. 207 с.
3. Балабеков О.С. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. М.: Химия, 1991. 256 с.
4. Атрощенко В.И. Курс технологии связанного азота. М.: Химия, 1968. 384 с.
5. Сиротюк В.В. Опыт и перспективы использования золошлаковых материалов в транспортном строительстве // *Расширение региональной сырьевой базы вовлечением в оборот золошлаковых материалов ТЭЦ ОАО «ТГК-11»*. Омск: ТГК-11, 2007. С. 37–52.
6. Ватин Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 4. С. 16–21.
7. Капустин Ф.Л., Фомина И.В. Малоцементные композиции на основе золы-уноса ТЭС // *Система*

управления экологической безопасностью: сборник трудов IX заочной международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 30–31 мая 2015 г. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 112–116.

8. Малахов Д.А. Актуализация применения золы-уноса в процессе изготовления неавтоклавного пенобетона // *Научные исследования и разработки студентов: сборник материалов Международной студенческой научно-практической конференции*. Чебоксары: Центр научного сотрудничества «Интерактив плюс», 2016. С. 78–81.

9. Ерощкина Н.А., Коровкин М.О., Чамурлиев М.Ю. Принципы выбора сырьевых компонентов в технологии получения геополимеров на основе золы уноса // *Теория. Практика. Инновации*. 2017. № 5. С. 153–161.

10. Делицын Л.М., Власов А.С. Комплексное использование углей на ТЭС // *ЭЖиП: Экология и промышленность России*. 2002. № 8. С. 37–39.

11. Maaroo M., Dursun S. Usability of fly ash from solid waste incineration as a concrete production as a supplement material // *Proceedings of the 3rd international conference on sustainable agriculture and environment*. Warsaw, Poland. September 26–28, 2016. Konya: Eğitim yayınevi, 2016. P. 421–427.

12. López-Zaldívar O., Mayor-Lobo P.L., Fernández-Martínez F., Hernández-Olivares F. Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators // *Materiales de Construcción*. 2015. V. 65. No. 319. P. 62–76.

13. Ватин Н.И., Чумадова Л.И., Гончаров И.С., Зыкова В.В., Карпеня А.Н., Ким А.А., Финашенков Е.А. 3D-печать в строительстве // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017. № 1. С. 27–46.

14. Wang S., Lu G.Q. Effect of chemical treatment on ni/fly-ash catalysts in methane reforming with carbon dioxide // *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2007. V. 167. P. 275–280.

15. Flores Y., Flores R., Gallegos A.A. Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system reactive black 5/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> // *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*. 2008. V. 281. No. 1–2. P. 184–191.

16. Leiva C., Vilches L.F., Arenas C., Delgado S., Fernández-Pereira C. Potential recycling of bottom and fly ashes in acoustic mortars and concretes // *ACI Materials Journal*. 2012. V. 109. No. 5. P. 529–535.

17. Kaye G.W.C., Evans E.J. The sound-absorbing properties of some common out-door materials // *Proceedings of the Physical Society*. 1940. V. 52. No. 3. P. 371–379.

18. Leiva C., Arenas C., Vilches L.F., Alonso-Fariñas B., Rodríguez-Galán M. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties // *Waste Management*. 2015. V. 46. P. 298–303.

19. Ge J. C., Yoon S. K., Choi N. J. Application of fly ash as an adsorbent for removal of air and water pollutants // *Applied Sciences*. 2018. V. 8. No. 7. Article No. 1116.

20. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-basin

coal fly ash with various kinds of lignin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. No. 2. P. 122–129.

21. Cho H., Oh D., Kim K. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2005. V. 27. No. 1–3. P. 187–195.

22. Itskos G., Koukouzas N., Vasilatos C., Megremi I., Moutsatsou A. Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particle-size-fractions of fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2010. V. 183. No. 1–3. P. 787–792.

23. Cho H.H., Kim S.H., Seo Y.C., Back S.K., Joung H.T., Yoon H.C., Hong J.H. Applicability of coal combustion ashes to use as additives in flue gas desulfurization // Proceedings of the 24th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management. V. 24. Osaka: Osaka Institute of Technology, 2013. P. 687–688.

24. Хитрин С.В., Фукс С.Л., Казиевков С.А., Филатов В.Ю., Суханова Е.Н. Способ переработки фторопластов и материалов, их содержащих, с получением ультрадисперсного фторопласта и перфторпарафинов // Патент Ru № 2528054. Заявление: № 16 (45), 10.06.2013. Дата публикации: 10.09.2014. Бюл. № 25.

### References

1. Fuks S.L., Khitrin S.V., Vologzhanina Yu.V., Pinaeva L.N., Mikhailitsyna Yu.S., Devyaterikova S.V. Closed cycle of production of ultrafine polytetrafluoroethylene and new areas of use of fluoropolymer manufacture waste // Russian Journal of Applied Chemistry. 2015. V. 88. No. 11. P. 1800–1807. doi: 10.1134/S10704272150110105

2. Goldinov A.L. Integrated nitric acid processing of phosphate rock. Leningrad: Khimiya, 1982. 207 p. (in Russian).

3. Balabekov O.S. Gas purification in the chemical industry. Processes and apparatuses. Moskva: Khimiya, 1991. 256 p. (in Russian).

4. Atroshchenko V.I. Fixed nitrogen technology course of. Moskva: Khimiya, 1968. 384 p. (in Russian).

5. Sirotyuk V.V. Experience and prospects of using ash and slag in transport construction // Rasshireniye regionalnoy syryevoy bazy vovlecheniyem v oborot zoloshlakoykh materiyalov TETs OAO “TGK-11”. Omsk: TGK-11, 2007. P. 37–52 (in Russian).

6. Vatyn N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lahtinen P. Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction // Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal. 2011. No. 4. P. 16–21 (in Russian).

7. Kapustin F.L., Fomina I.V. Diluted cement compositions based on fly ash from TPPs // Sistema upravleniya ekologicheskoy bezopasnosti: sbornik trudov IX zaochnoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ekaterinburg, 30–31 maya 2015 g. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2015. P. 112–116 (in Russian).

8. Malakhov D.A. Actualization of fly ash application in non-autoclaved foam concrete production process // Nauchnye issledovaniya i razrabotki studentov: sbornik materialov Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Cheboksary: Center of scientific cooperation “Interactive plus”, 2016. P. 78–81 (in Russian).

9. Eroshkina N.A., Korovkin M.O., Chamurliyev M.Yu. Principles of selection of raw material components in the technology of geopolymers production on the basis of fly ash // Teoriya. Praktika. Innovatsii. 2017. No. 5. P. 153–161 (in Russian).

10. Delitsyn L.M., Vlasov A.S. Integrated utilization of coals at TPPs // EKIP: Ekologiya i promyshlennost Rossii. 2002. No. 8. P. 37–39 (in Russian).

11. Maarooof M., Dursun S. Usability of fly ash from solid waste incineration as a concrete production as a supplement material // Proceedings of the 3rd international conference on sustainable agriculture and environment. Warsaw, Poland. September 26–28, 2016. Konya: Eğitim yayinevi, 2016. P. 421–427.

12. López-Zaldívar O., Mayor-Lobo P.L., Fernández-Martínez F., Hernández-Olivares F. Improved cement mortars by addition of carbonated fly ash from solid waste incinerators // Materiales de Construcción. 2015. V. 65. No. 319. P. 62–76. doi: 10.3989/mc.2015.07114

13. Vatyn N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S., Zykova V.V., Karpenya A.N., Kim A.A., Finashenkov E.A. 3D-printing in construction // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017. No. 1. P. 27–46 (in Russian). doi: 10.18720/CUBS.52.3

14. Wang S., Lu G.Q. Effect of chemical treatment on ni/fly-ash catalysts in methane reforming with carbon dioxide // Studies in Surface Science and Catalysis. 2007. V. 167. P. 275–280. doi: 10.1016/S0167-2991(07)80144-3

15. Flores Y., Flores R., Gallegos A.A. Heterogeneous catalysis in the Fenton-type system reactive black 5/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>// Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2008. V. 281. No. 1–2. P. 184–191. doi: 10.1016/j.molcata.2007.10.019

16. Leiva C., Vilches L.F., Arenas C., Delgado S., Fernández-Pereira C. Potential recycling of bottom and fly ashes in acoustic mortars and concretes // ACI Materials Journal. 2012. V. 109. No. 5. P. 529–535.

17. Kaye G.W.C., Evans E.J. The sound-absorbing properties of some common out-door materials // Proceedings of the Physical Society. 1940. V. 52. No. 3. P. 371–379. doi: 10.1088/0959-5309/52/3/307

18. Leiva C., Arenas C., Vilches L.F., Alonso-Fariñas B., Rodríguez-Galán M. Development of fly ash boards with thermal, acoustic and fire insulation properties // Waste Management. 2015. V. 46. P. 298–303. doi: 10.1016/j.wasman.2015.08.027

19. Ge J.C., Yoon S.K., Choi N.J. Application of fly ash as an adsorbent for removal of air and water pollutants // Applied Sciences. 2018. V. 8. No. 7. Article No. 1116. doi: 10.3390/app8071116

20. Fux S.L., Devyaterikova S.V., Musikhina T.A. Geosorbent based on the combination of Kuznetsk-Basin coal fly ash with various kinds of lignin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 272. No. 2. P. 122–129. doi: 10.1088/1755-1315/272/2/022053
21. Cho H., Oh D., Kim K. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2005. V. 27. No. 1–3. P. 187–195. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.019
22. Itskos G., Koukouzas N., Vasilatos C., Megremi I., Moutsatsou A. Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particle-size-fractions of fly ash // Journal of Hazardous Materials. 2010. V. 183. No. 1–3. P. 787–792. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.07.095
23. Cho H.H., Kim S.H., Seo Y.C., Back S.K., Joung H.T., Yoon H.C., Hong J.H. Applicability of coal combustion ashes to use as additives in flue gas desulfurization // Proceedings of the 24th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management. V. 24. Osaka: Osaka Institute of Technology, 2013. P. 687–688. doi: 10.14912/jsmcwm.24.0\_687
24. Khitrin S.V., Fuks S.L., Kaziyenkov S.A., Filatov V.Yu., Sukhanova E.N. method of recycling fluoro-plasts and materials, containing them, with obtaining ultradisperse fluoro-plast and perfluoroparaffins // Patent Ru No. 2528054. Application: No. 16 (45), 10.06.2013. Publishing date: 10.09.2014. Bull. No. 25 (in Russian).

## Механизм биосорбции металлов из электронных отходов микроскопическими водорослями

© 2023. А. А. Чугайнова, к. т. н., ст. преподаватель,

Л. В. Рудакова, д. т. н., профессор,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,

e-mail: Chugainova\_a@mail.ru, larisa.rudakova.007@gmail.com

Проведены исследования механизма биосорбции металлов из электронных отходов, а именно – из экранов мобильных телефонов/смартфонов и компьютерных мониторов микроскопическими водорослями. Эффективность процесса биосорбции металлов зависит от химических свойств извлекаемых металлов и от наличия функциональных групп, которые способны сорбировать металлы, в микроскопических водорослях. Для оценки эффективности сорбционной способности микроскопических водорослей и выявления функциональных групп, присутствующих в клеточной стенке водорослей, которые способны связывать металлы по механизму хемосорбции, были проведены аналитические исследования с применением методики анализа порошков на ИК-Фурье спектрометре. Результаты исследований показали, что сорбция металлов микроскопическими водорослями осуществляется по механизмам хемосорбции и физической сорбции. Хемосорбция осуществляется за счёт того, что в состав микроскопических водорослей входят amino- и гидроксильные группы, способные образовывать комплексы с ионами металлов. Физическая сорбция была доказана тем, что происходит частичное вымывание (не более 20%), сорбированных биомассой водорослей, металлов.

**Ключевые слова:** электронные отходы, микроскопические водоросли, биосорбция, извлечение металлов.

## Mechanism of biosorption of metals from e-waste by microscopic algae

© 2023. А. А. Chugainova ORCID: 0000-0003-1686-501X,

L. V. Rudakova ORCID: 0000-0003-3292-8359,

Perm National Research Polytechnic University,

29, Komsomolsky Prospect, Perm, Russia, 614990

e-mail: Chugainova\_a@mail.ru, larisa.rudakova.007@gmail.com

The development of technologies for extracting metals from waste is an urgent task. In this study, a poorly studied technology for the extraction of metals from electronic waste by microscopic algae, based on the biosorption method, was considered. The efficiency of the technology is determined both by the parameters of the biosorption process (properties and dose of biomass, temperature, pH, contact time of the adsorbate with the biosorbent), and the chemical composition of the solution obtained during the leaching of prepared electronic waste and containing metals. In the course of the study, the presence of functional groups in the biosorbent that could enter into chemical interaction with the recovered metals, the chemical properties of metals in the test solution were identified, and the leaching of the sorbed metals from the biosorbent was assessed. Microscopic algae of the species *Chlorella sorokiniana*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella spirulina*, and the genus *Scenedesmus* sp. were used as a biosorbent. The metal was sourced from mobile phone/smartphone screens and computer monitors. Analysis of the component composition of screens and monitors showed that it is represented by more than 10 different metals belonging to the group of basic metals and 7 metals belonging to the group of rare earth, rare and precious metals. Using the method of IR spectroscopy, the presence of the following functional groups in the cell walls and organoids of microscopic algae was proved: amino groups, hydroxyl and carboxyl groups. The results of experimental studies have established a mixed mechanism of biosorption, including physical sorption and chemisorption. As evidence, we used data on the partial leaching of sorbed metals from microscopic algae after the completion of the process.

**Keywords:** electronic waste, microscopic algae, biosorption, metal extraction.

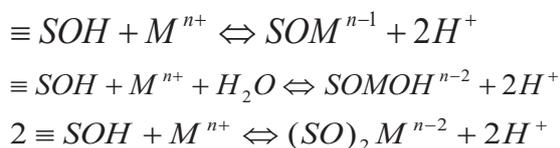
Металлы являются востребованным и исчерпаемым ресурсом, который необходимо сохранять и осуществлять поиск эффективных методов извлечения металлов из вторичных

источников. На сегодняшний день известны технологии извлечения драгоценных металлов, чёрных и цветных металлов из различных отходов производства и потребления [1–3].

К вторичным источникам металлов можно отнести электронные отходы, компонентный состав которых представлен более чем на 50% металлами [4]. Малоизученным остаётся извлечение редкоземельных и редких металлов из такого компонента электронных отходов как экраны смартфонов/мобильных телефонов и мониторы компьютеров. В связи с этим был исследован механизм извлечения редких металлов из электронных отходов с использованием микроскопических водорослей, способных к биосорбции.

Эффективность сорбции металлов основана на структурных особенностях биосорбента. Активное поглощение металлов микроскопическими водорослями осуществляется за счёт функциональных групп, к которым относятся гидроксильная и карбоксильная группы, амины, сложные эфиры, карбонильная группа, фосфаты и сульфгидрилы [5, 6]. Доказано, что **O-, N-, S- или P-содержащие группы непосредственно участвуют в сорбции определённых металлов** [7, 8].

Наиболее важными функциональными группами являются карбоксильные группы (-COOH), так как они имеют более сильное сродство к тяжёлым металлам. При этом решающую роль при сорбции металлов также играют функциональные группы, которые обладают высокой нуклеофильностью, например амины (-NH<sub>2</sub>), гидроксил и тиол (R-SH) [9, 10]. Закономерности связывания растворённых веществ и протонов активными поверхностными OH-группами гидроксидов объясняются теорией образования поверхностных комплексов или теорией поверхностного комплексообразования [10, 11]. В соответствии с данной теорией сорбция металлов гидроксидными осуществляется по следующей схеме [12]:



где  $\equiv$  – поверхность твёрдой фазы, *SOH*, *SOM*, *SOMOH*, *SO* – равновесные концентрации нейтральных, депротонированных и протонированных форм поверхности, моль/дм<sup>3</sup>.

Необходимые функциональные группы могут содержаться в микроскопических водорослях родов *Chlorella* (*C. sorokiniana*, *C. vulgaris*, *C. spirulina*) и *Scenedesmus* sp.

В литературных источниках приведены данные, свидетельствующие о том, что процесс

сорбции металлов зависит не только от параметров биосорбции, но также и от химических свойств металлов в растворе. Так, например, установлено, что эффективность сорбции зависит от притяжения положительно заряженных ионов и отрицательно заряженных участков биомассы [13].

Целью исследования являлось изучение механизма биосорбции металлов из экранов мобильных телефонов/смартфонов и компьютерных мониторов микроскопическими водорослями.

### Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись экраны смартфонов/мобильных телефонов, мониторы компьютеров. В качестве биосорбента использовали высушенную биомассу микроскопических водорослей рода *Chlorella*.

Подготовка экранов к исследованию проводилась по следующему плану:

1. Измельчение исследуемых образцов в шаровой мельнице РМ 100 фирмы Retsch (скорость измельчения 450 об./мин, степень измельчения менее 1 мм, время измельчения 2 мин). Размер частиц полученных образцов не превышал 1 мм.

2. Выщелачивание металлов из полученного порошка с применением 1М серной кислоты в соотношении 1 : 50 (сухое вещество : объём раствора), при температуре 90±2 °С и времени контакта 60 мин, после чего раствор фильтровали.

3. Анализ качественного и количественного состава рабочих растворов с использованием оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой [14–16].

4. Определение функциональных групп микроскопических водорослей методом инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопия) с преобразованием Фурье [17–21].

Для подтверждения гипотезы о смешанном механизме биосорбции (хемосорбция и физическая сорбция) после завершения процесса извлечения металлов микроскопическими водорослями проводили эксперимент по вымыванию сорбированных металлов. Вымывание металлов из микроскопических водорослей осуществляли путём промывки биомассы дистиллированной водой и 1М раствором серной кислоты. Полученный раствор анализировали на оптико-эмиссионном спектрометре для определения компонентного состава (табл. 1). Математическую и статистическую обработку полученных результатов

проводили с применением компьютерной программы Statgraphics 19 и метода дифференциального анализа ANOVA [22–24].

### Результаты и обсуждение

Результаты исследования компонентного состава образцов экранов мобильных телефонов/смартфонов и компьютерных мониторов, полученных путём измельчения, выщелачивания и затем проанализированных при помощи оптико-эмиссионного спектрометра представлены в таблице 1.

В составе мониторов, экранов смартфонов и мобильных телефонов было выявлено более 10 различных металлов, относящихся к основным металлам и 7 металлов, которые входят в группу редкоземельных, редких и драгоценных металлов.

Качественный состав во всех исследуемых образцах являлся одинаковым, отличались только количественные показатели. Это свидетельствует о том, что экраны мобильных телефонов/смартфонов и компьютерные мониторы целесообразно объединить в один поток отходов, что позволит увеличить объёмы обезвреживания отходов и сократить экономические расходы на утилизацию биотехнологическим методом.

Процесс биосорбции металлов микроскопическими водорослями зависит от химических свойств металлов, которые находились в исследуемом растворе. В связи с этим был проведён анализ свойств металлов: заряды ионов и значения рН, при которых происходит осаждение гидроксидов металлов (табл. 2).

Химические свойства металлов в растворе меняются в зависимости от значения рН, кроме того, рН раствора является важным параметром, который контролирует процесс биосорбции. По литературным данным [13, 26] при значениях рН раствора выше 4,5 происходит уменьшение концентрации ионов  $H^+$ , за счёт этого увеличивается притяжение между отрицательно заряженными участками биомассы растений и положительно заряженными ионами металлов, данные условия приводят к увеличению эффективности биосорбции металлов. При значениях рН ниже 4,5 существует наибольшая конкуренция за активные центры между ионами металлов и ионами водорода. Данная характеристика позволит в дальнейших исследованиях довести процесс биосорбции до селективного извлечения необходимого металла.

Вторым важным фактором эффективности процесса биосорбции является наличие функциональных групп в биосорбенте, в связи

Таблица 1 / Table 1

Результаты анализа качественного и количественного состава исследуемых проб  
Results of the analysis of the qualitative and quantitative composition of the test samples

Элемент Element	Экраны мобильных телефонов, мг/кг Mobile phone screens, mg/kg	Мониторы, мг/кг Monitors, mg/kg	Экраны смартфонов, мг/кг Smartphone screens, mg/kg
Ti	2840±210	3280±190	8156±35
Co	719±14	617±8	474±36
Ni	1968±19	4610±210	18180±390
Cu	5470±120	14800±190	15600±400
Zn	4300±500	1860±90	6870±150
As	9110±120	31940±180	276±27
Zr	1050±50	3870±190	5460±190
Mo	1590±130	2600±240	2900±190
Sb	10900±400	247±3	830±60
Ba	8840±290	12900±340	37630±320
W	11900±400	389±18	530±70
Pb	26±4	277±19	3270±180
Y	17±3	264±12	609±8
Ag	97±9	453±30	5670±210
In	660±33	716±8	771±17
Ce	21,8±2,2	230±17	79±4
Nd	44,2±1,4	298±12	23±6
Er	0,63±0,06	124±13	350±13
Ga	43±6	231±17	280±27

Химические свойства металлов / Chemical properties of metals [25] Таблица 2 / Table 2

Элемент Element	Заряд иона Ion charge	pH выделения гидроксидов pH for hydroxide recovery
Ti	3+	2–3
Co	2+	7
Ni	2+	9–10
Cu	2+	6–7
Zn	2+	8–9
Zr	4+	8
Mo	6+	4
Sb	5+	11
Ba	2+	12
W	6+	9
Pb	2+	6
Y	3+	9
Ag	1+	12
In	3+	4
Ce	4+	11
Nd	3+	13
Er	3+	9–11
Ga	3+	3

с этим был проведён анализ микроскопических водорослей до и после биосорбции при использовании методики анализа порошков на ИК-Фурье спектрометре (рис.).

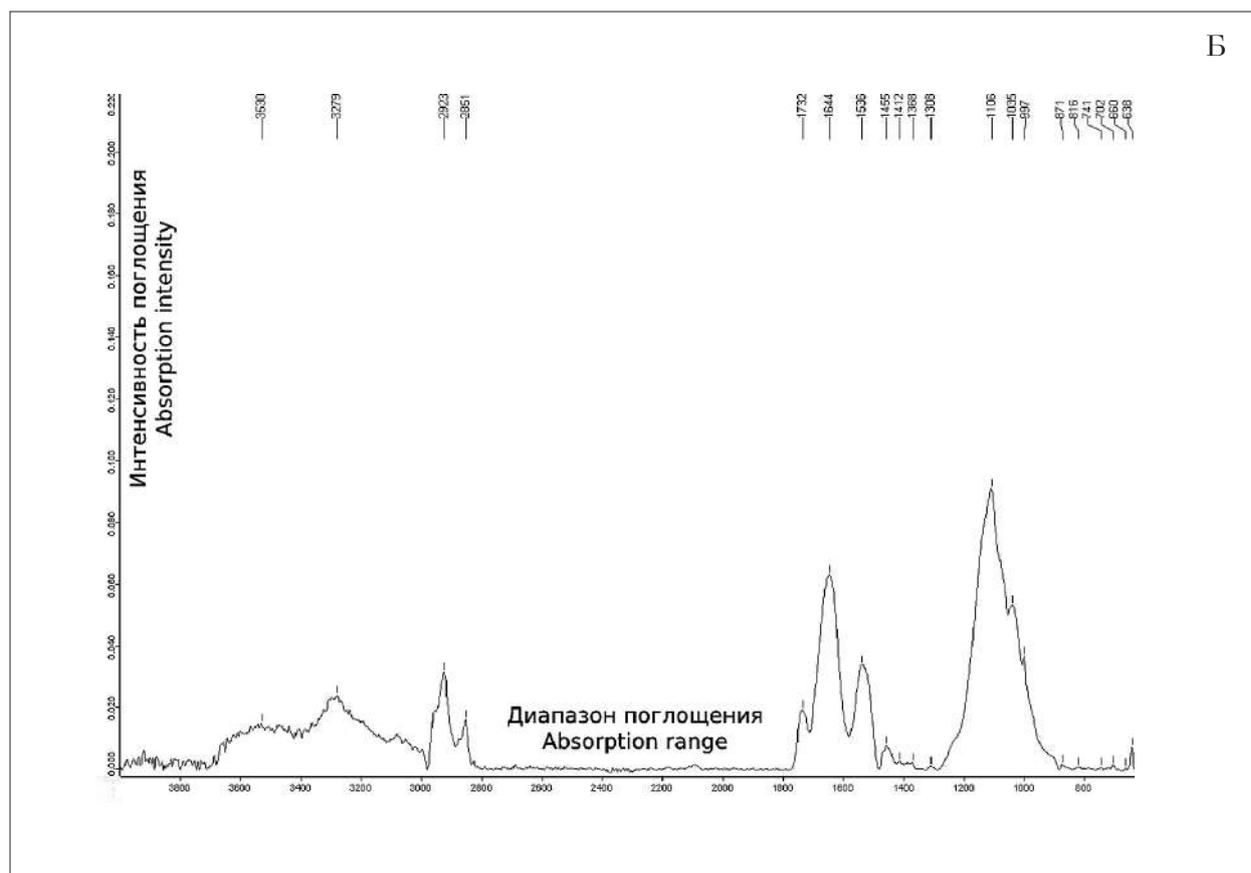
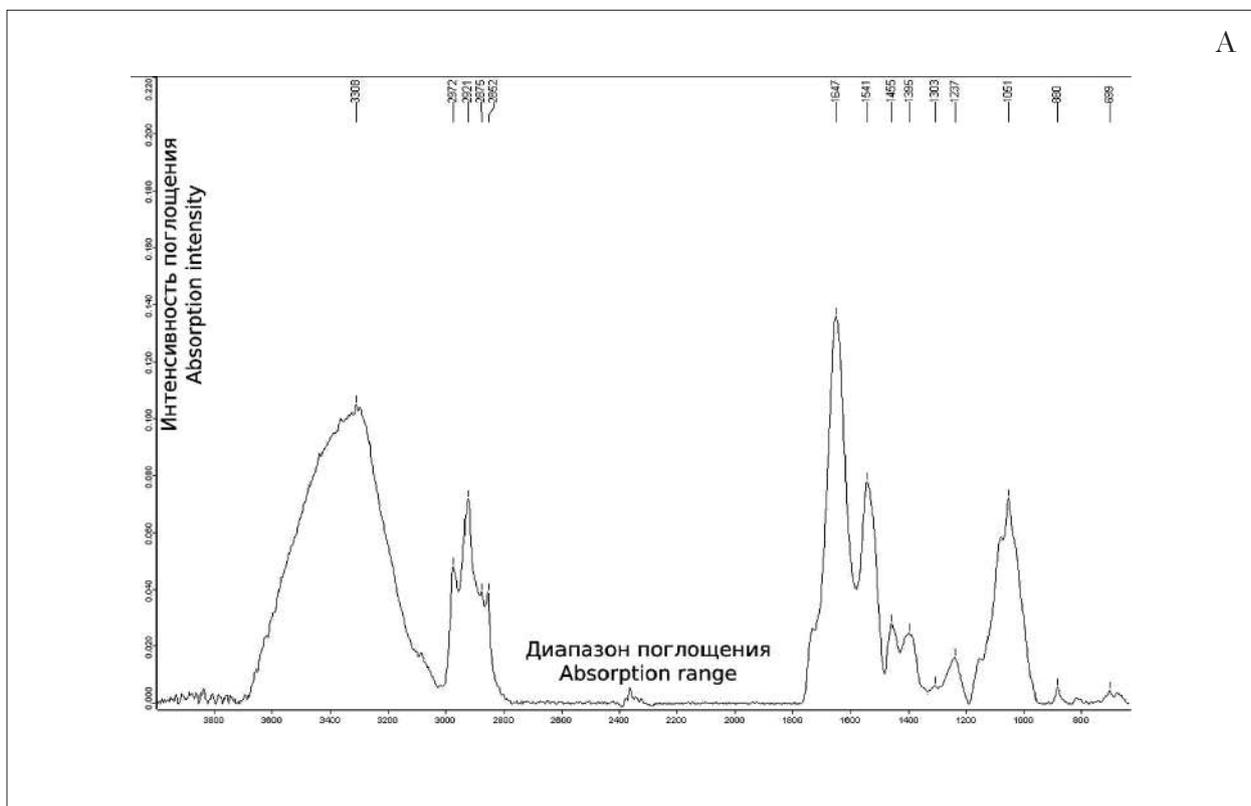
Широкий пик наблюдался в диапазоне 3600–3100 см<sup>-1</sup>, который относится к гидроксильным группам, связанным водородными связями (O-H). Пики при 3000–2500 см<sup>-1</sup> можно отнести к карбоновым кислотам (COOH). Относительно острый пик находится в диапазоне 1650–1500 см<sup>-1</sup> и может быть отнесён к группе аминов (NH деформационное колебание). Пики в диапазоне 1455–1237 см<sup>-1</sup> относятся к группе карбоксилат-анион. Пик при 1100–1000 см<sup>-1</sup> описывает валентное колебание C-O различных кислородсодержащих соединений, к которым относятся спирты и сложные эфиры. На основании полученных данных можно сделать вывод, что микроскопические водоросли содержат следующие функциональные группы: гидроксильные и карбоксильные группы, амины и сложные эфиры. Амино-, гидроксильные и карбоксильные группы относятся к функциональным группам, которые потенциально могут образовывать комплексы с ионами металлов в процессе биосорбции. Анализ микроскопических водорослей после процесса биосорбции показал уменьшение значений пиков, что свидетельствует о взаимодействии ионов металлов с ионами функциональных групп.

Для определения механизма биосорбции металлов микроскопическими водорослями были проведены дополнительные исследования, которые включали анализ полученного раствора после промывания микроскопических водорослей, содержащих сорбированные металлы.

Результаты вымывания металлов из микроскопических водорослей показали, что вымывание металлов составляет от 5 до 20% от количества сорбированных металлов микроскопическими водорослями. Частичное вымывание металлов указывает на то, что происходит физическая сорбция.

### Заключение

В составе исследованных образцов выявлено 15 металлов, из которых 7 относятся к группам редкоземельных, редких и драгоценных металлов. Анализ компонентного состава экранов смартфонов/мобильных телефонов и мониторов компьютеров на оптико-эмиссионном спектрометре показал, что качественный состав всех образцов одинаковый, отличаются только количественные характеристики. Это свидетельствует о том, что все исследуемые образцы можно объединить в один поток обезвреживаемых отходов. Благодаря этому будет возможно уменьшение экономических расходов и увеличение количества извлекаемых металлов.



**Рис.** Результаты ИК-спектрометрии, диапазон поглощения  $\text{cm}^{-1}$ :  
 А – микроводоросли до биосорбции, Б – микроводоросли после биосорбции  
**Fig.** Results of IR spectrometry, uptake range  $\text{cm}^{-1}$ :  
 А – microalgae before biosorption, Б – microalgae after biosorption

Химические свойства металлов влияют на эффективность их извлечения. При более низких значениях pH уменьшается конкуренция между ионами за активные центры связывания биомассы, тем самым повышается эффективность извлечения.

Микроскопические водоросли содержат такие функциональные группы, как амино- и гидроксильные группы, которые потенциально могут образовывать комплексы с ионами металлов в процессе биосорбции.

Наличие указанных функциональных групп и результаты исследований по вымыванию сорбированных металлов из биомассы микроскопических водорослей подтвердили гипотезу о смешанном механизме процесса биосорбции, включающем хемосорбцию, на что указывают данные ИК-спектроскопии, и физическую сорбцию, доказательством которой является частичное вымывание ионов металлов (не более 20%), сорбированных биомассой водорослей.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта № FSNM-2020-0024.*

## References

- Vokhidov B.R. Development of technology for obtaining platinum metals from industrial waste // Eurasian Union of Scientists (EUS). 2020. No (75). P. 38–46 (in Russian). doi: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.75.822
- Vodolazov L.I., Komarov A.V., Shatalov V.V., Solodyannikov A.A., Ushkova T.N., Serebryakov I.S., Galkina Z.I. A method for extracting gold and silver from electronic and electrical industry waste // Patent RU 2066698 C1. Application: 93031214/02, 22.06.1993. Date of publication: 20.09.1996. (in Russian).
- Das N., Das D. Recovery of rare earth metals through biosorption: An overview // Journal of Rare Earths. 2013. V. 31. No. 10. P. 933–943. doi: 10.1016/S1002-0721(13)60009-5
- Chugainova A., Rudakova L. Effectiveness assessment of different methods of indium leaching from mobile phone screens // E3S Web of Conferences. 2020. V. 161. Article No. 01077. doi: 10.1051/e3sconf/202016101077
- Volesky B. Biosorption and me // Water Research. 2007. V. 41. No. 18. P. 4017–4029. doi: 10.1016/j.watres.2007.05.062
- Fokina A.I., Ashikhmina T.Ya., Domracheva L.I., Gornostaeva E.A., Ogorodnikova S.Yu. Heavy metals as factors of metabolic change in microorganisms (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2015. No 2. P. 5–18 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-005-018
- Wang W., Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future // Biotechnology Advances. 2009. V. 27. No. 2. P. 195–226. doi: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.002
- Domracheva L.I., Kovina A.L., Kondakova L.V., Ashikhmina T.Ya. Cyanobacterial symbioses and their practical use (review) // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 3. P. 21–30 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-021-030
- Işıldar A., van Hullebusch E.D., Lenz M., Laing G.D., Marra A., Cesaro A., Panda S., Akcil A., Kucuker M.A., Kuchta K. Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review // Journal of Hazardous Materials. 2019. V. 362. P. 467–481. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.08.050
- Sugasini A., Rajagopal K., Banu N. A Study on biosorption potential of *Aspergillus* sp. of tannery effluent // Advances in Bioscience and Biotechnology. 2014. V. 5. P. 853–860. doi: 10.4236/abb.2014.510100
- Sokolova T.A., Trofimov S.Ya. Sorption properties of soils. Adsorption. Cation exchange. Tula: Grif i K, 2009. 172 p. (in Russian).
- Zenobi M.C., Rueda E.H. Ternary surface complex: coadsorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and nitritoltris(methylenephosphonic)acid onto boehmite // Quim. Nova. 2012. V. 35. No. 3. P. 505–509. doi: 10.1590/S0100-40422012000300012
- Kucuker M.A., Wieczorek N., Kuchta K., Copty N.K. Biosorption of neodymium on *Chlorella vulgaris* in aqueous solution obtained from hard disk drive magnets // PLoS ONE. 2017. V. 12. No. 4. Article No. e0175255. doi: 10.1371/journal.pone.0175255
- Zhong W.S., Ren T., Zhao L.J. Determination of Pb (Lead), Cd (Cadmium), Cr (Chromium), Cu (Copper), and Ni (Nickel) in Chinese tea with high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry // Journal of Food and Drug Analysis. 2016. V. 24. P. 46–55. doi: 10.1016/j.jfda.2015.04.010
- Assubaie F.N. Assessment of the levels of some heavy metals in water in Alahsa Oasis farms, Saudi Arabia, with analysis by atomic absorption spectrophotometry // Arabian Journal of Chemistry. 2015. V. 8. P. 240–245. doi: 10.1016/j.arabjc.2011.08.018
- Bressy F.C., Brito G.B., Barbosa I.S., Teixeira L.S.G., Korn M.G.A. Determination of trace element concentrations in tomato samples at different stages of maturation by ICP OES and ICP-MS following microwave-assisted digestion // Microchemical Journal. 2013. V. 109. P. 145–149. doi: 10.1016/j.microc.2012.03.010
- Shutova V.V., Tyutyaev E.V., Churin A.A., Ponomarev V.Yu., Belyakova G.A., Maksimov G.V. IR and raman spectroscopy in the study of carotenoids of *Cladophora rivularis* algae // Biophysics. 2016. V. 61. No. 4. P. 711–716. doi: 10.1134/S0006350916040217

18. Koptev G.S., Pentin Yu.A. Calculation of molecular vibrations. Moskva: Izdatelstvo MGU, 1977. 208 p. (in Russian).
19. Politaeva N.A., Smyatskaya Yu.A., Tatarintseva E.A. Using adsorption material based on the residual biomass of *Chlorella sorokiniana* microalgae for wastewater purification to remove heavy metal ions // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. V. 55. No. 11–12. P. 907–912. doi: 10.1007/s10556-020-00712-z
20. Vijayaraghavan K., Sathishkumar M., Balasubramanian R. Interaction of rare earth elements with a brown marine alga in multi-component solutions // Desalination. 2011. V. 265. P. 54–59. doi: 10.1016/J.DESAL.2010.07.030
21. Wan Ngah W.S., Hanafiah M.A.K.M. Biosorption of copper ions from dilute aqueous solutions on base treated rubber (*Hevea brasiliensis*) leaves powder: kinetics, isotherm, and biosorption mechanisms // Journal of Environmental Sciences. 2008. V. 20. P. 1168–1176. doi: 10.1016/s1001-0742(08)62205-6
22. Volkova P.A., Shipunov A.B. Statistical data processing in educational and research works. Moskva: FORUM: INFRA-M, 2022. 96 p. (in Russian).
23. Svetozarov V.V. Basics of statistical processing of measurement results. Moskva: Izdatelstvo MIFI, 2005. 40 p. (in Russian).
24. Statistical processing of the results of an active experiment / Ed. T.N. Gartman. Moskva: RKhTU, 2006. 52 p. (in Russian).
25. Kalyukova E.N. Properties of metals and their compounds. Ulyanovsk: UIGTU, 2009. 156 p. (in Russian).
26. Robalds A., Naya G.M., KLavins M. Highlighting inconsistencies regarding metal biosorption // Journal of Hazardous Materials. 2016. V. 304. P. 553–556. doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.042

## Технологические решения и опыт промышленной переработки жидких хромсодержащих отходов

© 2023. В. А. Бродский<sup>1</sup>, к. х. н., доцент,  
А. В. Перфильева<sup>1</sup>, к. т. н., главный специалист,  
Ю. О. Малькова<sup>1</sup>, вед. инженер, А. В. Колесников<sup>1</sup>, к. т. н., доцент,  
Н. М. Макарова<sup>2</sup>, д. х. н., начальник отдела,

<sup>1</sup>Российский химико-технологический университет имени 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

Анализ перечня жидких отходов I и II классов опасности федерального классификационного каталога отходов (ФККО) показал, что к одному из наиболее распространённых отходов относятся сточные воды, отработанные технологические растворы, содержащие ионы хрома (III, VI). Данный вид отходов составляет до 15% от общего количества жидких техногенных отходов I и II классов опасности, образующихся в результате деятельности гальванических и химических предприятий. Соединения шестивалентного хрома относятся к классу токсичных, чрезвычайно опасных веществ, предельно допустимая концентрация (ПДК) в воде водных объектов питьевого назначения для хрома (VI) составляет 0,05 мг/л. Особенностью данного вида отходов является повышенный солевой фон, характерный для электролитов, используемых в гальванических производствах.

В статье представлены экспериментальные данные, а также приведены принципиальные технологические решения по обезвреживанию хромсодержащих сточных вод и отработанных технологических растворов. Предложена технологическая схема, содержащая четыре основные стадии: восстановления шестивалентного хрома, выделения трёхвалентного хрома из водных растворов, отделения сопутствующих соединений тяжёлых и цветных металлов, фильтрационная доочистка раствора. Экспериментальные исследования показали, что в зависимости от ионного состава среды эффективность выделения соединений трёхвалентного хрома из водных растворов методом электрофлотации варьирует от 8 до 95%. Введение анионного флокулянта позволяет повысить степень извлечения до 99% и более.

**Ключевые слова:** промышленные отходы, сточные воды, хром (VI), хром (III), ионы тяжёлых металлов, технология, дисперсная фаза, флокуляция, электрофлотация, фильтрация.

## Technological solutions and experience of industrial processing of liquid chromium-containing waste

© 2023. V. A. Brodskiy<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-2266-795X<sup>2</sup>  
A. V. Perfiljeva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6923-8709<sup>3</sup>, Yu. O. Malkova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6166-9950<sup>4</sup>  
A. V. Kolesnikov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4586-6612<sup>5</sup>, N. M. Makarova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-3113-4899<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,  
9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047,

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise "Federal Environmental Operator",  
6, Pyzhevsky Pereulok, Moscow, Russia, 119017,  
e-mail: vladimir\_brodsky@mail.ru

Analysis of the list of liquid wastes of hazard classes I and II in the Federal Classification Catalog of waste (FCCW) showed that one of the most common wastes is wastewater, waste technological solutions containing chromium ions (III, VI). This type of waste accounts for up to 15% of the total amount of liquid technogenic waste of hazard classes I and II, formed as a result of the activities of electroplating and chemical enterprises. Hexavalent chromium compounds belong to the class of toxic, extremely dangerous substances, the maximum permissible concentration (MPC) in the water of drinking water bodies for chromium (VI) is 0.05 mg/L. A feature of this type of waste is the increased salt background characteristic of electrolytes used in electroplating industries.

The article presents experimental data, as well as basic technological solutions for the neutralization of chromium-containing wastewater and waste technological solutions. A technological scheme containing four main stages is proposed:

reduction of hexavalent chromium, isolation of trivalent chromium from aqueous solutions, separation of accompanying compounds of heavy and non-ferrous metals, filtration post-treatment of the solution. Experimental studies have shown that, depending on the ionic composition of the medium, the efficiency of isolation of trivalent chromium compounds from aqueous solutions by electroflotation varies from 8 to 95%. The introduction of an anionic flocculant makes it possible to increase the degree of extraction to 99% or more.

**Keywords:** industrial waste, wastewater, chromium(VI), chromium(III), heavy metal ions, technology, dispersed phase, flocculation, electroflotation, filtration.

Образование многих видов техногенных отходов (ТО) связано с применением устаревших технологий, которые во многих случаях используются и в настоящее время. В качестве примера применения таких технологий можно привести использование электролитов (ЭЛ) шестивалентного хромирования в гальванических производствах. Данные электролиты позволяют получать покрытия высокого качества, однако крайне токсичны. Полный переход на менее токсичные ЭЛ трёхвалентного хромирования до сих пор не завершён по причине более низких эксплуатационных свойств получаемых покрытий.

Анализ перечня жидких ТО (ЖТО) I и II классов опасности, приведённых в федеральном классификационном каталоге отходов (ФККО), показал, что необходима переработка таких ЖТО, как отработанные кислоты (серная, соляная, азотная, фосфорная), остатки щелочных реагентов (гидроксидов калия и натрия), отходов, содержащих соединения хрома(VI), отработанные растворы обработки металлических поверхностей (фосфатирования, оксидирования, обезжиривания, пассивации, травления и других), отработанные ЭЛ (никелирования, цинкования, кадмирования и другие), ЭЛ, имеющие в своём составе цианистые соединения, отработанные медно-аммиачные растворы, растворы, содержащие серебро и другие ценные компоненты (Приказ Роспотребнадзора от 22.05.2017 № 242).

Количество хромсодержащих отходов в общем объёме ЖТО достигает 15%. В то же время, соединения хрома(VI) относятся к классу токсичных, чрезвычайно опасных веществ. В соответствии с законодательством Российской Федерации, предельно допустимая концентрация (ПДК) в воде водных объектов питьевого назначения для хрома(VI) составляет 0,05 мг/л, хрома(III) – 0,5 мг/л в соответствии с показателями СанПиН 2.1.4.1074-01, что в общем случае соответствует требованиям ВОЗ, ЕС, USEPA [1]. В связи с этим задача переработки хромсодержащих отходов требует особого внимания.

Хром и его соединения широко применяются во многих отраслях промышленности,

в том числе в металлургии при плавках сталей, при нанесении гальванических покрытий. Добавки хрома используются при выплавке сталей особой прочности, пригодных для изготовления землероходческих и буровых машин, сталей с повышенной коррозионной устойчивостью и жаростойкостью [2, 3]. Соединения шестивалентного хрома (хромовая и дихромовая кислоты, их соли) широко используются в различных технологических процессах гальванохимических производств (ГП): при химическом травлении и пассивировании поверхности деталей из обычной, оцинкованной и кадмированной стали, медных сплавов, при хромировании и электрополировании стальных деталей, а также при электрохимическом анодировании деталей из алюминия. Высокотоксичные соли хрома(VI) используются для получения коррозионностойких декоративных покрытий.

Актуальность переработки жидких хромсодержащих отходов обусловлена двумя основными причинами:

- 1) экологическими, обусловленными токсичностью соединений хрома(VI);
- 2) экономическими, обусловленными тем, что соединения хрома могут быть утилизированы с получением ценных компонентов, в том числе катализаторов на основе оксида хрома(III).

Цель работы – экспериментальный поиск и апробация оптимальных технологических решений обезвреживания и утилизации жидких хромсодержащих отходов сложного состава с выделением продуктов, пригодных для дальнейшей переработки.

### Объекты и методы исследования, технологические решения

В практике очистки ЖТО наиболее часто встречаются многокомпонентные хромсодержащие системы. В таблице 1 представлен перечень жидких ТО, содержащих соединения хрома(III) и (VI) в соответствии с перечнем ФККО. Таким образом, деятельность металлургических, гальвано-химических и металлообрабатывающих производств приводит

Таблица 1 / Table 1

Состав жидких отходов ФККО, содержащих соединения хрома(III, VI)  
Composition of liquid waste FCCW containing chromium compounds(III, VI)

Код Code	Назначение Appointment	Состав, % Composition, %	Производство (тех. процесс) Production (tech. process)
3 63 351 11 10 1	Растворы химического хромирования Chemical chrome plating solutions	Cr(VI) – 17,50; H <sub>2</sub> O – 82,50	Химическая обработка металлов. Химическое хромирование чёрных металлов Chemical processing of metals. Chemical chrome plating of ferrous metals
3 63 441 12 10 2	Электролит хромирования отработанный высокоопасный Chromium plating electrolyte waste highly hazardous	1. Fe – 9,00; Cr(VI) – 22,56; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> – 12,96; Cd – 3,01; Zn – 5,35; Cu – 2,31; Pb – 0,08; Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> – 7,22; H <sub>2</sub> O – 37,49 2. Fe – 0,02; Ca – 0,05; Mg – 0,03; Cu – 0,01; Cr(III) – 0,10; Zn – 0,02; Cr(VI) – 0,02; H <sub>2</sub> O – 99,72	Обработка металлических поверхностей методом электролитического осаждения. Хромирование металлических поверхностей Treatment of metal surfaces by electrolytic deposition. Chrome plating of metal surfaces
3 63 812 11 10 2	Смешанные стоки обработки металлов и нанесения покрытий на металлы, содержащие соединения хрома Mixed wastewater of metal processing and coating of metals containing chromium compounds	Fe – 0,0007; Cu – 0,01; Cd – 0,005; Pb – 0,01; Mn – 0,0008; Zn – 0,01; Ca – 0,0005; S – 0,03; Ni – 0,003; Cr(III, VI) – 0,28; H <sub>2</sub> O – 99,65	Обработка поверхности металлов и нанесение покрытий на металлы Metal surface treatment and coating of metals

к образованию большого количества металл-содержащих ЖТО, отработанных технологических растворов (ОТР) и сточных вод (СВ), содержащих ионы и растворимые соединения хрома в различных валентных состояниях.

Государственная политика в области обращения с отходами I и II классов опасности определяется национальным проектом «Экология» и предусматривает переработку таких отходов с использованием наилучших доступных технологий, к которым относятся физико-химические методы обработки [4].

При извлечении малорастворимых соединений металлов из многокомпонентных систем возможны следующие варианты:

1. Ионы металлов образуют малорастворимые соединения в виде гидроксидов при близких значениях pH. Примерами таких смесей служит система Cr(III)-Fe(III)-Al(III); pH 7,0.

2. Ионы металлов образуют малорастворимые соединения в виде гидроксидов при различных значениях pH, при этом при минимальной растворимости этих соединений pH отличается на две, три и более единицы.

К таким системам можно отнести Cr(III)-Cu(II), Ni(II)-Zn(II); Cr(III)-Fe(II), Ni(II)-Cd(II) и др. Различие величин pH минимальной растворимости составляет 2,5 единицы. В этом случае, при низких значениях pH, один из компонентов системы присутствует в ионном виде, другой – в дисперсном состоянии.

В результате анализа состава хромсодержащих ЖТО для их обезвреживания предложена технологическая схема (рис. 1, 2), содержащая три основные стадии:

I. Восстановления растворимых соединений Cr(VI) до Cr(III).

II. Выделения Cr(III) из водных растворов в виде малорастворимых соединений – гидроксидов Cr(OH)<sub>3</sub>.

III. Отделения твёрдой части, содержащей малорастворимые соединения чёрных (ЧМ) и цветных металлов (ЦМ), в том числе содержащей гипс (CaSO<sub>4</sub>) и CaF<sub>2</sub> и доочистки растворов от дисперсной фазы труднорастворимых соединений Cr<sup>3+</sup>, ЧМ и ЦМ.

Одним из перспективных и современных методов доочистки СВ от ионов металлов является метод электрофлотации (ЭФ) [5,

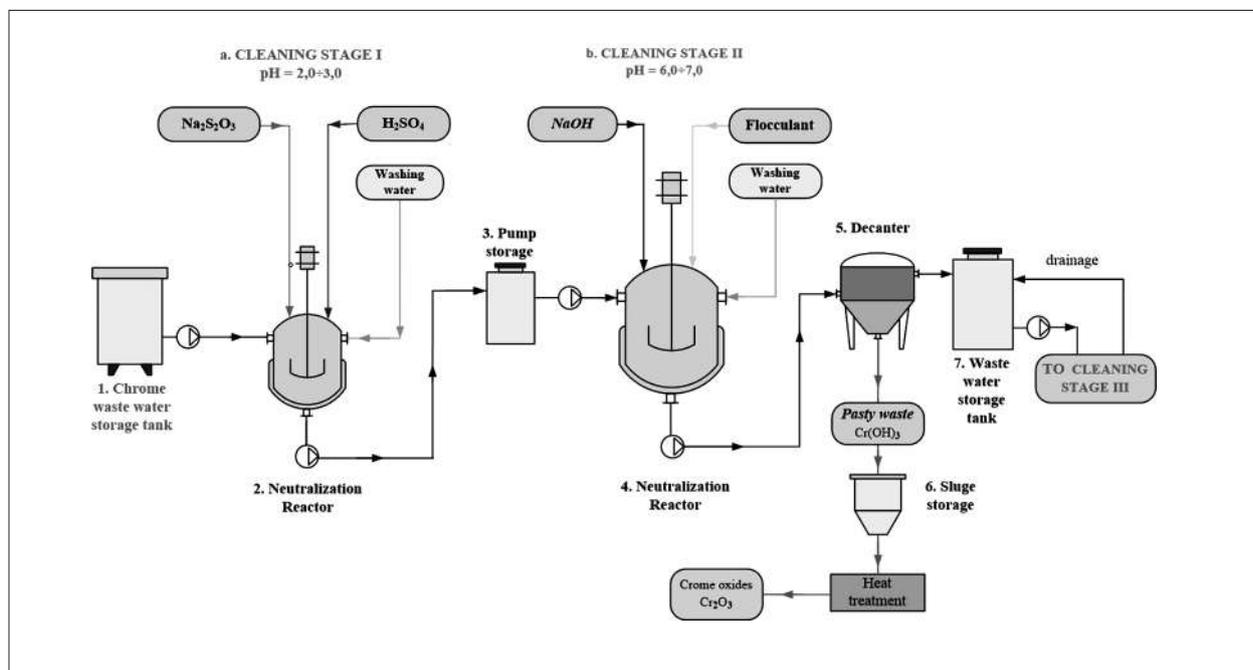


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема процесса очистки хромосодержащих сточных вод, стадии I и II, извлечения соединений Cr(III)  
 Fig. 1. Schematic flow diagram of the process of purification of chromium-containing wastewater, stages I and II, extraction of Cr(III) compounds

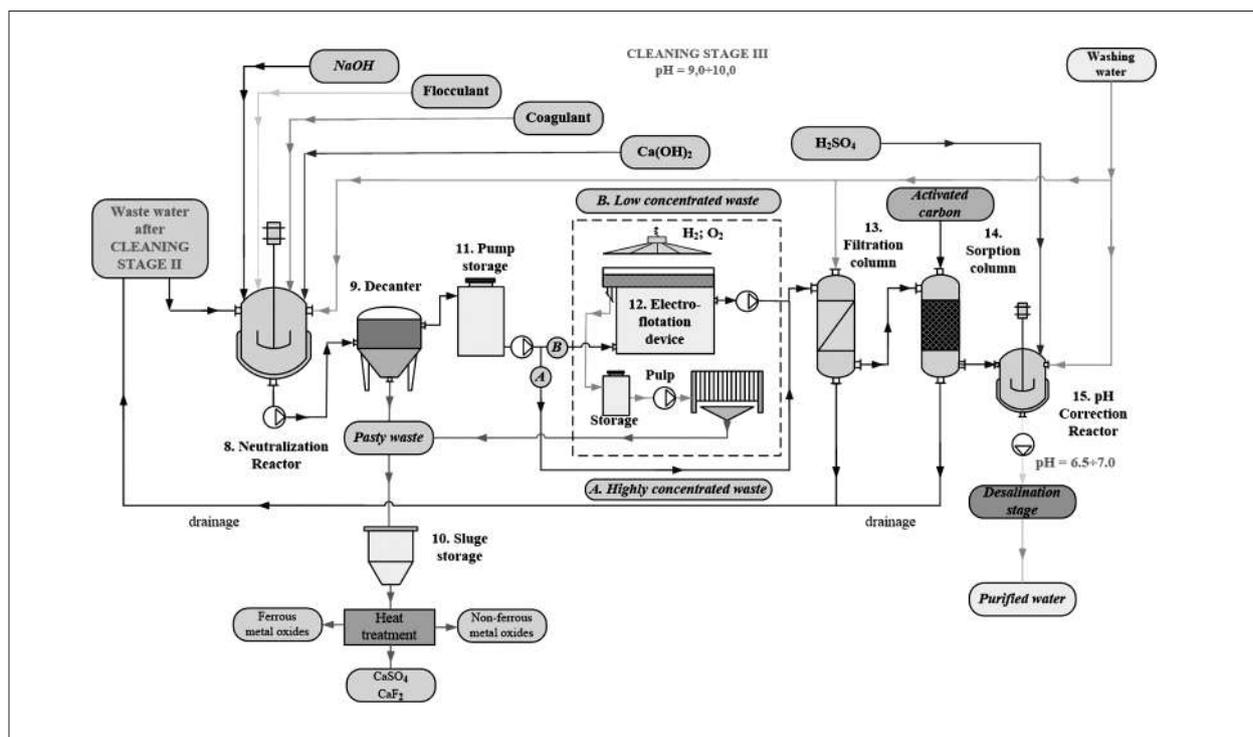
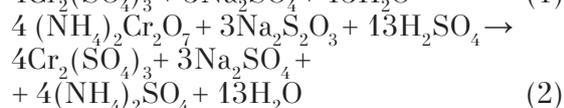
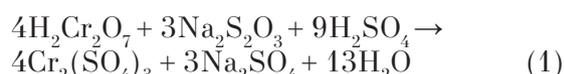


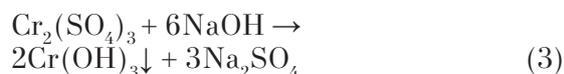
Рис. 2. Принципиальная технологическая схема процесса очистки хромосодержащих сточных вод, стадия III извлечения цветных и тяжёлых металлов  
 Fig. 2. Schematic flow diagram of the process of purification of chromium-containing wastewater, stage III extraction of non-ferrous and heavy metals

6], подходящий в качестве метода очистки СВ либо метода доочистки ОТП с суммарной концентрацией по ионам металлов до 300 г/л. Устройство и принцип действия промышленного электрофлотационного аппарата приведены в [7].

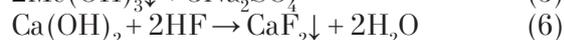
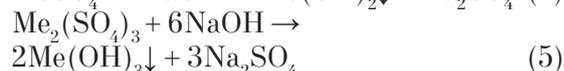
В качестве реагента восстановителя на стадии I возможно использование гипосульфита натрия  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaHSO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,  $\text{SO}_2$  (и других соединений четырёхвалентной серы), стальных и алюминиевых стружек и других восстановителей [8–10]. Реакции восстановления шестивалентного хрома гипосульфитом натрия протекают в соответствии с уравнениями:



На следующем этапе (стадия II) в реакторы добавляется раствор  $\text{NaOH}$ , либо жидкий щелочной отход до значения pH 6,0–7,0:



На заключительной стадии III происходит выделение дисперсной фазы, содержащей малорастворимые соединения (МС) тяжёлых и цветных металлов (ТМ и ЦМ) и выделения  $\text{CaSO}_4$  и  $\text{CaF}_2$  (при наличии в отходах ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{F}^-$ ) в виде осадков в интервале pH 9–10:



Предложенная схема очистки отвечает современным требованиям к переработке отходов I и II классов опасности с получением вторичных продуктов – гидроксидов хрома(III), пригодных для переработки.

В соответствии с принятой схемой очистки, основными стадиями очистки являются: восстановление растворимых соединений Cr(VI) до Cr(III), перевод ионов Cr(III) металлов в форму МС с использованием реагентных методов с последующим ступенчатым отделением дисперсной фазы (ДФ) МС Cr(III) от ДФ соединений сопутствующих металлов Me(II, III) от потока очищаемого раствора. На стади-

ях очистки I–II для укрупнения частиц ДФ МС хрома(III) и интенсификации процесса их отделения от очищаемой воды целесообразно использовать растворы флокулянтов [11].

После нейтрализации (стадии очистки I, II), раствор с ДФ МС хрома(III), ТМ и ЦМ целесообразно декантировать с целью отделения твёрдой фазы от жидкой, а осветлённый раствор следует подать на стадию доочистки (стадия III), на которой целесообразно использовать коагулянты [11, 12].

Таким образом, с целью подбора оптимальных технологических параметров процесса очистки необходимо:

- исследовать зависимость остаточных концентраций ионов металлов, присутствующих в отходе в фильтрате от pH среды;
- исследовать эффективность процесса ЭФ извлечения МС хрома(III) из растворов с различным ионным составом;
- дать оценку влияния природы флокулянтов на физико-химические характеристики и показатели эффективности извлечения ДФ МС хрома(III) из водных растворов методами электрофлотации и фильтрации.

Экспериментальные исследования проводили с использованием модельных растворов, имитирующих по качественному и количественному составу хромсодержащие СВ. Модельные растворы, в зависимости от условий эксперимента, содержали:

- малорастворимые соединения  $\text{Cr}^{3+}$ ;
- катионы ТМ и ЦМ и соли жёсткости ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ );
- анионы ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  и др.);
- высокомолекулярные соединения (флокулянты) анионного, катионного и неионного типов.

Перевод ионов хрома(III) и сопутствующих металлов в форму МС осуществляли путём корректировки pH обрабатываемых растворов в диапазоне 5–10. Исследование ЭФ активности МС хрома(III) проводили при объёмной плотности тока, варьировавшейся в диапазоне 0,1–0,4 А/л. Исходная концентрация ионов хрома(III) в растворах варьировалась от 50 до 150 мг/л, катионов – до 1 г/л, анионов – до 1 г/л. Концентрация флокулянтов – 2 мг/л. Фильтрацию растворов проводили с использованием обеззоленных фильтров «синяя лента» с диаметром пор 2–3 мкм.

Эффективность процесса очистки растворов от МС хрома(III) и сопутствующих металлов оценивали по показателю степени извле-

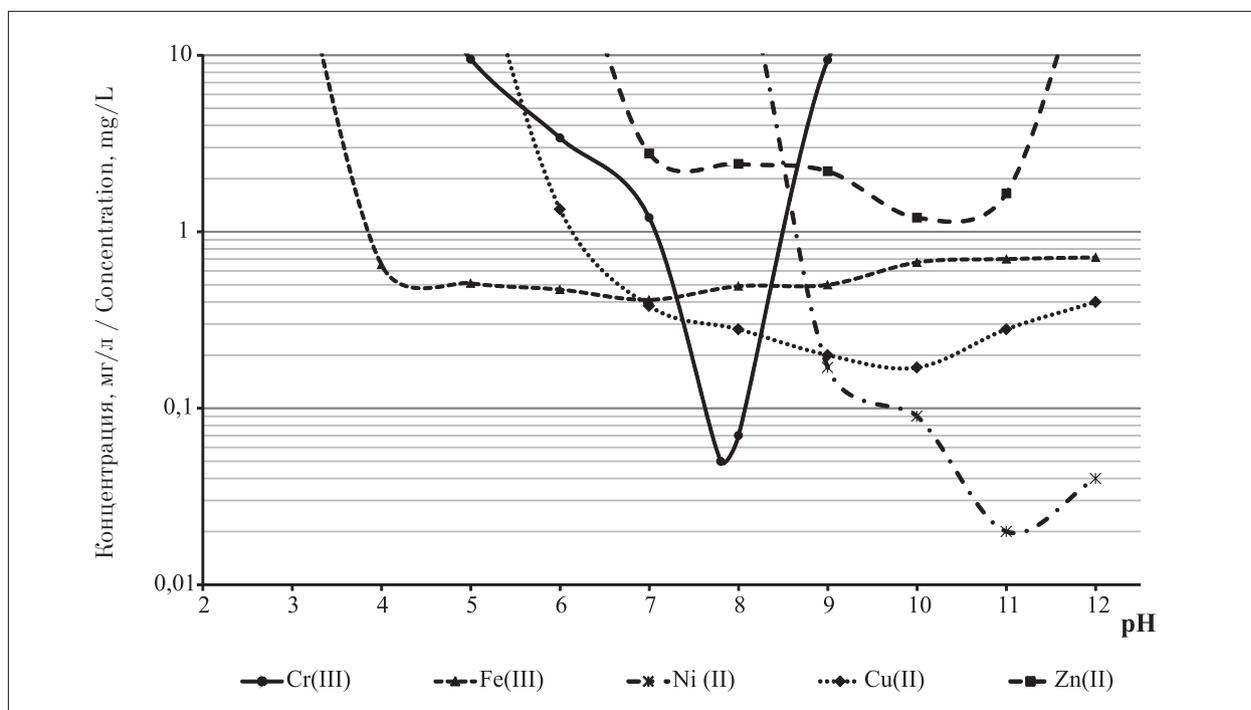


Рис. 3. Логарифмы остаточных концентраций ионов металлов в фильтрате в зависимости от pH среды: 1 – Cr(III), 2 – Fe(III), 3 – Ni(II), 4 – Cu(II), 5 – Zn(II).  $C_{исх.}(Me^{n+}) = 50$  мг/л

Fig. 3. Logarithms of the residual concentrations of metal ions in the filtrate depending on the pH of the medium: 1 – Cr(III), 2 – Fe(III), 3 – Ni(II), 4 – Cu(II), 5 – Zn(II).  $C(Me^{n+}) = 50$  mg/L

чения металлов ( $\alpha$ , %), которую рассчитывают как отношение разницы между исходной и конечной концентрациями металлов в растворе (в связанной, ионной и молекулярной формах):  $\alpha = [(C_0 - C_T)/C_0] \cdot 100\%$ . Массовую концентрацию металлов определяли с использованием атомно-абсорбционного спектрометра KVANT-2A по стандартизованной методике.

### Результаты и обсуждение

**Влияние pH среды на физико-химические характеристики основных металлов, входящих в хромосодержащие СВ.** На первом этапе экспериментальных исследований было изучено влияние pH среды на растворимость соединений хрома(III), железа(III), никеля(II), меди(II) и цинка(II) методом фильтрации с использованием обеззоленных фильтров «синяя лента». Зависимость остаточной концентрации исследованных металлов от pH представлена на рисунке 3.

Установлено, что образование МС хрома(III) в водных растворах возможно после достижения pH 5,0. Минимальная остаточная концентрация хрома(III) в фильтрате наблюдается при pH 8,0 и составляет 0,05 мг/л (более 99,9% хрома переходит в форму МС). Увеличение pH до 9 и выше приводит

к резкому повышению растворимости ДФ, что, в соответствии с данными диаграммы состояния потенциал-pH, может быть объяснено растворением гидроксида хрома  $Cr(OH)_3$  в щелочной среде с образованием хромат-ионов  $CrO_4^{2-}$  [13]. Ионы  $Fe^{3+}$  на 99% переходят в форму МС уже в интервале pH 4–5. Минимальная остаточная концентрация железа в фильтрате не превышает 0,4 мг/л при pH 7. Исследование влияния pH на растворимость частиц ДФ меди позволило установить, что, начиная с pH 6, более 97% меди находится в труднорастворимом виде, минимальной растворимостью частицы ДФ меди обладают в интервале pH 9–11. Так, при pH 10, 99% меди находится в дисперсной форме, остаточная концентрация – 0,17 мг/л. Ионы цинка(II) на 98% переходят в форму МС при pH 10, а ионы никеля(II) на 99,9% при pH 11. Остаточная концентрация ионов цинка и никеля в растворе составляет 1,2 и 0,02 мг/л соответственно.

Данные о растворимости ДФ позволяют сделать вывод о том, что исследуемые металлы в случае совместного нахождения в растворе могут быть выделены из раствора при последовательном извлечении соединений железа и (или) хрома, хрома и марганца в интервалах pH 5,0–8,0; 9,0–11,0 соответственно. При этом, при наличии в отходе железа, целесообразно провести предварительное обезжеле-

зивание раствора в интервале pH 4,0–5,0, что позволит селективно отделить МС хрома и соединения ЦМ.

С целью оптимизации технологических параметров разработанной схемы в части стадии доочистки было проведено обобщение экспериментальных исследований процесса ЭФ извлечения МС хрома(III) из растворов с различным ионным составом (табл. 2). Показано, что процесс ЭФ извлечения МС хрома(III) интенсифицируется в присутствии ионов Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> и Al<sup>3+</sup>. Присутствие остальных

ионов не влияет на эффективность ЭФ процесса, либо затрудняет его.

Показано, что наибольшее негативное воздействие на эффективность протекания ЭФ процесса оказывают соли жёсткости, а также нитрат-ионы (рис. 4). С повышением мольного отношения ионов Cr<sup>3+</sup> по отношению к ионам Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> с 1 : 1 до 1 : (1–10), степень извлечения хрома снижается с 77–79 до 8–10% [14]. Таким образом, показана целесообразность использования флокулянтов, позволяющих

Таблица 2 / Table 2

Эффективность электрофлотационного извлечения малорастворимых соединений хрома(III) в присутствии ионов различной природы  
Efficiency of electroflotation extraction of poorly soluble chromium(III) compounds in the presence of ions of various nature

№	Дисперсная фаза / Disperse phase	Показатели процесса Process indicators	
		α, % (электро-флотация ЭФ / electro-flotation EF)	τ <sub>эф</sub> , мин τ <sub>EF</sub> , min
1	Cr(OH) <sub>3</sub>	80–83	12–15
2	[Cr(OH) <sub>3</sub> ]*:[Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] = 1 : (2–10)	28–92	
3	[Cr(OH) <sub>3</sub> ]:[CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , F <sup>-</sup> , S <sup>2-</sup> , PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ] = 1 : (1–10)	30–90	
4	[Cr(OH) <sub>3</sub> ]:[Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ] = 1 : (1–10)	8–79	
5	[Cr(OH) <sub>3</sub> ]:[Cu <sup>2+</sup> , Ni <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Cd <sup>2+</sup> ] = 1 : (2–10)	65–80	
6	[Cr(OH) <sub>3</sub> ]:[Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> , Al <sup>3+</sup> ] = 1 : (1–10)	85–95	

Примечание: C<sub>усл.</sub> Cr<sup>3+</sup> = 50–100 мг/л, i<sub>в</sub> = 0,2–0,4 А/л.  
Note: C<sub>res.</sub> Cr<sup>3+</sup> = 50–100 mg/L, i<sub>v</sub> = 0.2–0.4 A/L.

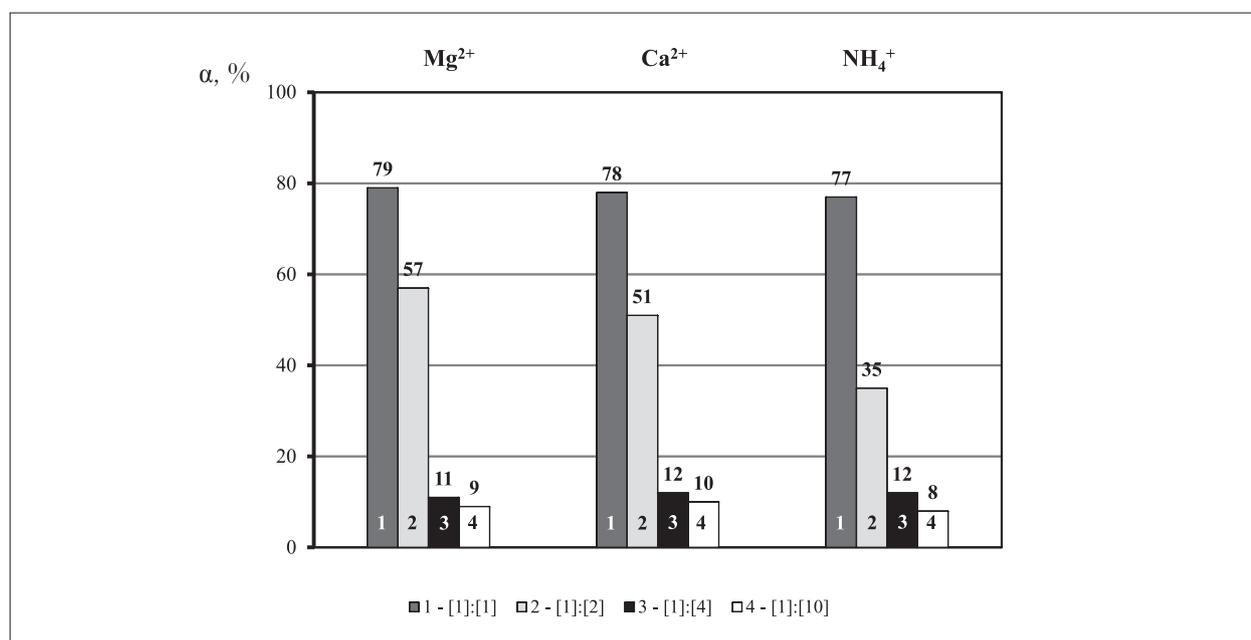


Рис. 4. Влияние катионов Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> на степень извлечения малорастворимых соединений хрома, C(Cr<sup>3+</sup>) = 50 мг/л, i<sub>в</sub> = 0,2–0,4 А/л  
Fig. 4. The effect of Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> cations on the degree of extraction of poorly soluble chromium compounds, C(Cr<sup>3+</sup>) = 50 mg/L, i<sub>v</sub> = 0.2–0.4 A/L

Таблица 3 / Table 3

Влияние природы флокулянтов на физико-химические характеристики и эффективность извлечения малорастворимых соединений хрома(III)  
 The influence of the nature of flocculants on the physico-chemical characteristics and efficiency of extraction of poorly soluble chromium(III) compounds

Дисперсная фаза Dispersed phase	Природа флокулянта Floculant nature	$d_{cp}$ , мкм $d_{av}$ , mμ (average diameter)	$\zeta$ , мВ $\zeta$ , mV (electrokinetic potential)	$\alpha_{max}$ , % (ЭФ) $\alpha_{max}$ , % (electroflotation, EF)	$C_{ост. Cr^{3+}}$ , мг/л (ЭФ) $C_{res. Cr^{3+}}$ , mg/L (EF)	$C_{ост. Cr^{3+}}$ , мг/л (ЭФ+Ф) $C_{res. Cr^{3+}}$ , mg/L (EF & F, filtration)
$Cr(OH)_3$	–	13,5	15	80–83	8–10	2,5–2,6
$Cr(OH)_3 + M 10$	анионный anionic	91,5	8–10	98–99	0,5–1	0,04–0,06
$Cr(OH)_3 + ПАА-ГС$		72,5	10–12	92–96	2–4	0,3–0,5
$Cr(OH)_3 + A 137$		48,5	10–12	88–90	5–6	0,8–1,2
$Cr(OH)_3 + N 300$	неионный nonionic	50,2	15	66–68	16–17	0,8–1,2
$Cr(OH)_3 + C 496$	катионный cationic	52,5	8–10	92–94	3–4	0,3–0,5

Примечание:  $C_{исх. Cr^{3+}} = 50-100$  мг/л,  $C_{флок.} = 2$  мг/л,  $i_{об.} = 0,2-0,4$  А/л.  
 Note:  $C_{res. Cr^{3+}} = 50-100$  mg/L,  $C_{floc.} = 2$  mg/L,  $i_v = 0.2-0.4$  A/L.

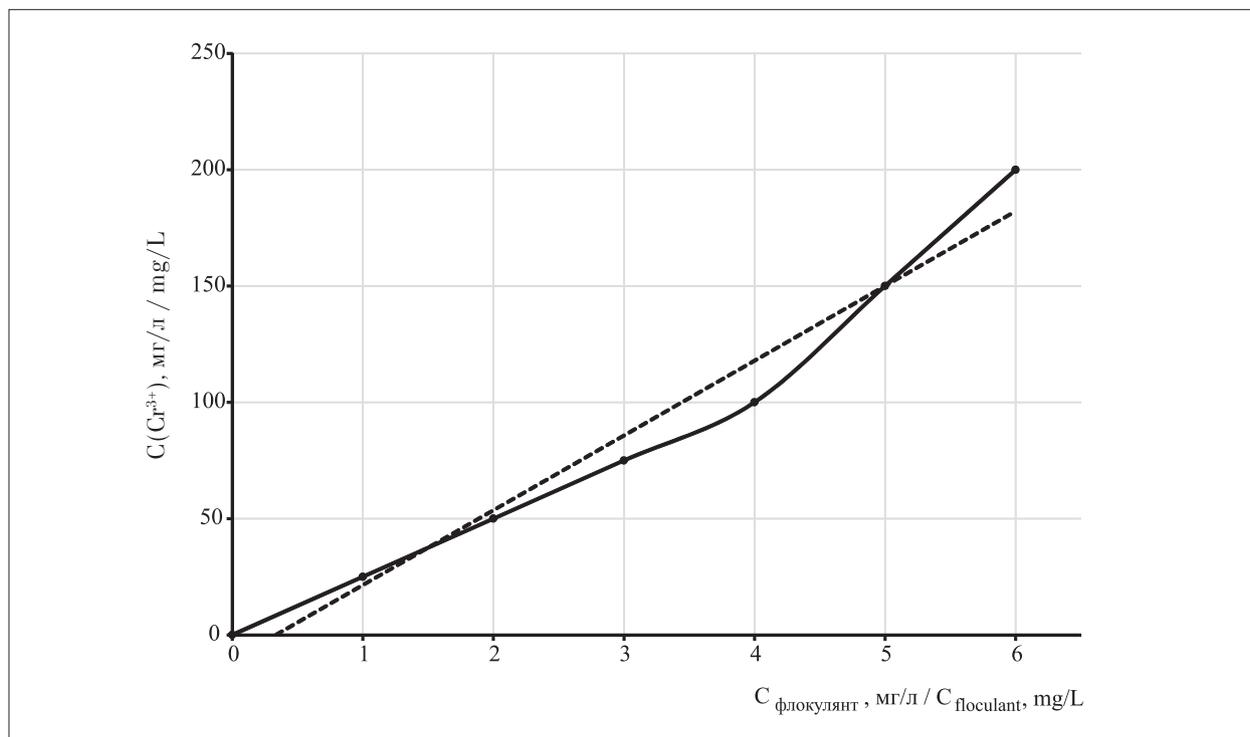


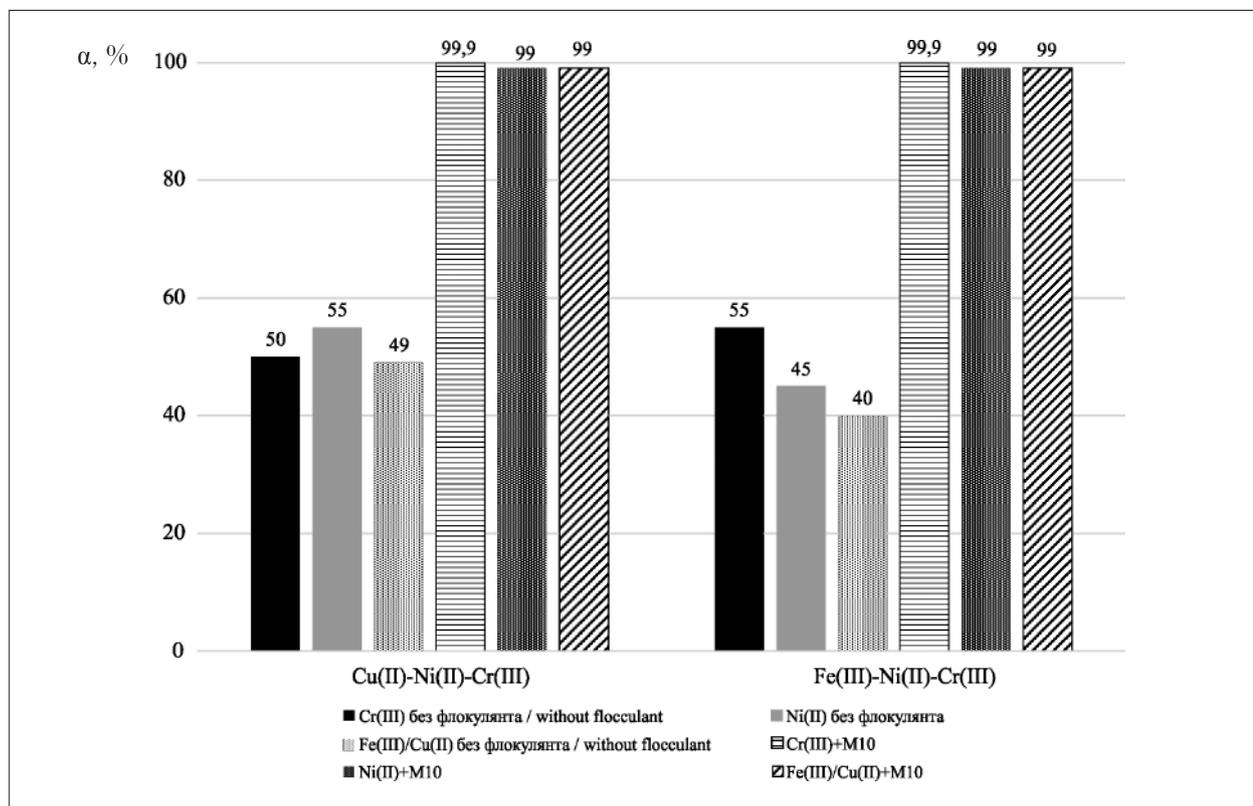
Рис. 5. Зависимость концентрации флокулянта М-10 от исходной концентрации малорастворимых соединений хрома  
 Fig. 5. Dependence of the concentration of flocculant M-10 on the initial concentration of poorly soluble chromium compounds

повысить эффективность процесса ЭФ извлечения МС хрома(III).

В таблице 3 представлены полученные ранее данные [15], обобщающие влияние флокулянтов различной природы на физико-химические характеристики (средний гидродинамический диаметр  $d_{cp}$ , электрокинетический потенциал  $\zeta$ ) и показатели эффектив-

ности извлечения частиц ДФ МС хрома(III) методами ЭФ и фильтрации (Ф).

Наибольшую эффективность показал анионный флокулянт М-10. Степень извлечения увеличивается с 80–83 до 98–99%, а остаточная концентрация уменьшается с 2,5 до 0,04–0,06 мг/л. Данный факт обусловлен тем, что в присутствии М-10 ДФ  $Cr(OH)_3$  обла-



**Рис. 6.** Электрофлотационное извлечение малорастворимых соединений хрома(III) из трёхкомпонентных систем Cu(II)–Ni(II)–Cr(III) и Fe(II)–Ni(II)–Cr(III) с флокулянт M-10,  $C_{\text{исх.}}(\text{Me}^{n+}) = 50 \text{ мг/л}$ , pH 9–9,5,  $C_{\text{исх.}}(\text{M10}) = 2\text{–}5 \text{ мг/л}$ ,  $i_{\text{ог.}} = 0,2\text{–}0,4 \text{ А/л}$   
**Fig. 6.** Electroflotation extraction of poorly soluble chromium (III) compounds from 3-component systems Cu(II)–Ni(II)–Cr(III) and Fe(II)–Ni(II)–Cr(III) with flocculant M-10,  $C(\text{Me}^{n+}) = 50 \text{ mg/L}$ , pH 9–9.5,  $C(\text{M10}) = 2\text{–}5 \text{ mg/L}$ ,  $i_v = 0.2\text{–}0.4 \text{ A/L}$

дает наиболее крупным размером, ζ-потенциал ближе к изоэлектрической точке.

Установлена зависимость концентрации вводимого в систему флокулянта M-10 от исходной концентрации МС хрома(III), при которой достигается максимальная степень извлечения ( $\alpha \geq 95\%$ ) при продолжительности ЭФ 8–10 мин с использованием флокулянта M-10 (рис. 5). Анализ зависимости позволил рассчитать соотношение исходной концентрации МС хрома(III) к введённому флокулянту, которое составляет 1 : (0,03–0,04). Данное соотношение концентраций позволяет поддерживать средний гидродинамический диаметр  $d_{\text{ав}}$  ДФ на уровне 90–120 мкм. Аналогичная зависимость характерна для более распространённого промышленного флокулянта ПАА-ГС.

На рисунке 6 представлены обобщающие результаты ЭФ извлечения МС хрома(III) из трёхкомпонентных модельных систем. Как показали результаты исследований, использование специально подобранных флокулянтов и условий их применения позволяет интенсифицировать ЭФ процесс извлечения

малорастворимых соединений ТМ и ЦМ в 2–3,5 раза и повысить их степень извлечения с 5–60 до 92–99%, соединений хрома(III) – до 99,9% при условии последующей фильтрации.

### Заключение

Экспериментальные исследования и опыт промышленной эксплуатации предложенной трёхстадийной схемы очистки СВ и ОТР, содержащих ионы хрома(VI), показали, что совместное использование реагентной обработки, ЭФ, и мембранной очистки СВ, при условии использования коагулянтов в количестве 50–100 мг/л и флокулянтов в количестве 2–5 мг/л, позволяет добиться следующих показателей очистки: степень очистки от МС хрома более 99%, сопутствующих ТМ и ЦМ – 92–99%; остаточная концентрация по ионам ТМ и ЦМ – не более 0,1 мг/л.

Реализована возможность селективного выделения и разделения в виде пастообразного продукта с влажностью 60% гидроксидов хрома(III) и сопутствующих металлов с низ-

ким значением рН образования гидроксидов (рН 5,0–6,0) и смеси гидроксидов ТМ и ЦМ образование гидроксидов при рН 9,0–10,0.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках ВИГ-2022-073.*

### References

1. Water Framework Directive (WFD) 2000/60/EC [Internet resource] <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/water-framework-directive-wfd-2000> (Accessed: 19.11.2023).
2. Kolpishon E.Yu., Ivanova M.V., Shitov E.V. Nitrogen-containing steels of equivalent composition // Ferrous Metals. 2007. No. 2. P. 10–12 (in Russian).
3. Gorynin I.V., Malyshevskiy V.A., Kalinin G.Yu., Mushnikova S.Yu., Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V. Corrosion-resistant high-strength nitrogenous steels // Questions of materials science. 2009. No. 3 (59). P. 7–16 (in Russian).
4. 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
5. Mohtashami R., Shang J.Q. Electroflotation for treatment of industrial wastewaters: A focused review // Environmental Processes. 2019. V. 6. P. 325–353. doi: 10.1007/s40710-019-00348-z
6. Khelifa A., Moulay S., Naceur A.W. Treatment of metal finishing effluents by the electroflotation technique // Desalination. 2005. V. 181. No. 1–3. P. 27–33. doi: 10.1016/j.desal.2005.01.011
7. Brodskiy V.A., Kolesnikov A.V., Malkova Yu.O., Kisilenko P.N., Perfil'eva A.V. Technological solutions and experience of industrial processing of liquid acid-alkaline waste // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 34–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-034-042
8. Khalturina T.I., Bobrik A.G., Churbakova O.V. Reagent purification of chromium-containing wastewater // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014. No. 6 (89). P. 128–134 (in Russian).
9. Prasad P., Das C., Golder A. Reduction of Cr(VI) to Cr(III) and removal of total chromium from wastewater using scrap iron in the form of zerovalent iron (ZVI): Batch and column studies // Can. J. Chem. Eng. 2011. V. 89. No. 6. P. 1575–1582. doi: 10.1002/cjce.20590
10. Gheju M., Balcu I. Removal of chromium from Cr(VI) polluted wastewaters by reduction with scrap iron and subsequent precipitation of resulted cations // J. Hazardous Mater. 2011. V. 196. P. 131–138. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.09.002
11. Tzoupanos N.D., Zouboulis A.I. Coagulation-flocculation processes in water/wastewater treatment: the application of new generation of chemical reagents // Proceedings of the 6th ASME/WSEAS International Conference on heat transfer, thermal engineering and environment (HTE'08). Rhodes. Greece. 2008. P. 309–317.
12. Bratby J. Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment. London, Seattle: IWA Publishing, 2006. 583 p. doi: 10.2166/9781780402321
13. Poling L. General chemistry / Eds. D.A. Frank-Kamenetsky, R. Hayward. Moskva: Mir, 1964. 583 p. (in Russian).
14. Perfil'eva A.V., Il'in V.I., Kolesnikov V.A. Intensification of the electroflotation process of extraction of the dispersed phase of chromium(III) from aqueous solutions // Advances in chemistry and chemical technology. 2014. V. 28. No. 5 (154). P. 92–94 (in Russian).
15. Perfil'eva A.V., Brodskii V.A., Il'in V.I., Kolesnikov V.A. Effect of the composition of the medium and electroflotation processing parameters on extraction efficiency of chromium(III) dispersed phase from aqueous solutions // Russ J Appl Chem. 2016. No. 89. P. 388–393. doi: 10.1134/S1070427216030071

## Повышение качества и расширение ассортимента продуктов на основе технического монокальцийфосфата

© 2023. И. А. Почиталкина, д. т. н., профессор, И. М. Костанов, аспирант, И. Б. Сибирякова, аспирант, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125480, Россия, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20, e-mail: ilmana@mail.ru

Рассмотрена перспектива получения линейки продуктов на базе низкосортного фосфатного сырья с использованием экономически и экологически целесообразной солянофосфорнокислотной технологии. Показана возможность получения двойного суперфосфата ( $P_2O_5 = 46$  масс. %), представленного исключительно подвижной (водорастворимой) формой фосфора, за счёт удаления железа(III), содержащегося в примесях, из технического монокальцийфосфата ( $P_2O_5 = 35$  масс. %) методом изотермической перекристаллизации.

Развитие тепличных хозяйств и требования к закрытым грунтам накладывают жёсткие ограничения на состав примесей в используемых минеральных удобрениях. В действующих ГОСТах на фосфорсодержащие удобрения регламентируются физико-химические и физико-механические показатели: концентрация питательных элементов, влагосодержание, pH 10% раствора, гранулометрический состав, прочность гранул, рассыпчатость, концентрация тяжёлых металлов, оставляя без внимания ряд примесей, например, железа(III), способных приводить к ретроградации фосфора. Достаточно простая технология получения монокальцийфосфата (МКФ) из фосфоритов позволяет получать дешёвый эффективный продукт из низкосортных руд, чем объясняется высокий спрос на него у аграриев. При обеспечении требований СанПиН о ПДК контролируемых примесей в МКФ его можно использовать и в животноводстве. Развитие направления «Зелёная химия» предполагает использование водорастворимых удобрений и исключает содержание токсичных элементов, способных аккумулироваться в почве. Железо(III), экстрагированное из примесных минералов, связываясь с фосфором, образует  $FePO_4$  с цитраторастворимой формой  $P_2O_5$ , тем самым снижая подвижную форму ( $P_{2O_5\text{вод}}$ ) в продукте. Изотермическая перекристаллизация МКФ с балластной примесью позволяет получить более концентрированный продукт, соответствующий по содержанию основного компонента ( $P_{2O_5\text{вод}}$ ) показателям двойного суперфосфата, и очистить его от соединений железа до следового количества.

Показана возможность очистки технического МКФ методом изотермической перекристаллизации до показателей, соответствующих двойному суперфосфату сельскохозяйственного назначения, за счёт удаления примесей железа до следового количества, что расширяет область его применения.

**Ключевые слова:** монокальцийфосфат, двойной суперфосфат, очистка, рециркуляционные технологии, перекристаллизация.

## The quality improvement and products expansion on technical monocalcium phosphate base

© 2023. I. A. Pochitalkina ORCID: 0000-0002-1063-1856, I. M. Kostanov ORCID: 0000-0002-4360-2170, I. B. Sibiryakova ORCID: 0000-0002-7142-6688, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 20, Geroyev Panfilovtsev St., Moscow, Russia, 125480, e-mail: ilmana@mail.ru

Production of a low-grade phosphate raw materials-based line of products using economically and environmentally appropriate hydrochloric-phosphoric acid technology is a promising area. A double superphosphate ( $P_2O_5 = 46$  wt. %) was obtained by isothermal re-crystallization due to removing iron(III) from impurities of the technical monocalcium phosphate ( $P_2O_5 = 35$  wt. %). The obtained product is represented exclusively by a mobile (water-soluble) phosphorus form.

The development of greenhouses and requirements for closed soils impose strict restrictions on the impurities composition in the mineral fertilizers. The current State standards regulate such physico-chemical and physico-mechanical parameters of phosphorus-containing fertilizers as nutrients' concentration, moisture content, pH of 10% solution, granulometric composition, granules' strength, friability, heavy metals' concentration. But they ignore a number of impurities, for example, iron(III), that can lead to phosphorus retrogradation. The simple enough technology makes it possible to obtain cheap effective product – monocalcium phosphate (MCP) – from low-grade ores (phosphorites). This

explains the high demand for it among farmers. MCP can also be used in animal husbandry, provided that the sanitary regulations and norms requirements on MPC of controlled impurities are met. The development of the “Green Chemistry” involves the use of water-soluble fertilizers and eliminates the toxic elements content that can accumulate in the soil. The iron(III) extracted from impurity minerals binds to phosphorus and forms  $\text{FePO}_4$  with the citrate-soluble form of  $\text{P}_2\text{O}_5$ , thereby reducing its mobile form ( $\text{P}_2\text{O}_5^{\text{wat}}$ ) in the product. A more concentrated product corresponding to the double superphosphate in the main component ( $\text{P}_2\text{O}_5^{\text{wat}}$ ) content was produced by isothermal re-crystallization of MCP with ballast impurity. In addition, the final product was purified from iron compounds to trace amounts.

Thus, purification of technical MCP by isothermal recrystallization method due to the removal of iron impurities to trace amounts expands the field of its application.

**Keywords:** monocalcium phosphate, double superphosphate, purification, recycling technologies, re-crystallization.

Критический анализ состояния и развития производства, а также рынка минеральных удобрений в мире показывает их неуклонный рост, к 2025 г. прогнозируется увеличение мирового потребления минеральных удобрений на 15–20%. Такая тенденция характерна и для производства фосфорных удобрений в России, где только за последние 10 лет их потребление увеличилось более чем на 31% [1, 2].

Монокальцийфосфат (МКФ) является основным действующим веществом фосфорных удобрений и входит в состав простого, двойного и тройного суперфосфата. Эти удобрения в странах ближнего и дальнего зарубежья считаются наиболее востребованными продуктами, что объясняется сравнительно низкой стоимостью и высокой эффективностью удобрения, пригодного для большинства типов почв [3]. Кроме того, МКФ находит широкое применение в качестве кормовой добавки для животных [4].

Постоянный рост потребления минеральных удобрений приводит к истощению природных ресурсов Российской Федерации. Апатиты, применяемые в качестве основного сырья, представляют собой эндогенную породу. Общая формула:  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaX}^-$ , где X – возможные анионы:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{OH}^-$ . В среднем такой минерал содержит достаточное количество основного компонента  $\text{P}_2\text{O}_5$ , необходимого для производства удобрения высокого качества, порядка 35–42% [5].

В настоящее время в объеме общемировых запасов фосфатного сырья апатитовые руды составляют лишь 6%, а 94% приходится на фосфориты, которые отличаются низким содержанием  $\text{P}_2\text{O}_5$  и более высоким содержанием примесей, препятствующих переработке фосфоритов стандартными методами. По этой причине для повышения плодородия почв фосфориты, пройдя физико-механическую обработку, чаще всего, используются в виде фосфоритной муки (ООО «АИП «Фосфаты», ООО «ПГ «Фосфорит», ОАО «Воскресенские минеральные удобрения», ООО «Верхнекам-

ские удобрения») [6]. Агрохимическая эффективность фосфоритной муки невелика из-за ограниченной подвижности фосфора, поэтому она используется исключительно на кислых и слабокислых почвах. По объему разведанных запасов Вятско-Камское месторождение фосфоритов является промышленно значимым и для его вовлечения в производство фосфорсодержащих удобрений необходима разработка рентабельной технологии с учетом специфики сырья [7–9].

В целях рационального использования минеральных ресурсов показана возможность комплексной переработки низкосортных видов фосфатного сырья [10]. Авторы предполагают обеспечить рентабельность его промышленной переработки с помощью рециркуляционной технологии, предусматривающей возврат маточного раствора в цикл [11], а также за счет использования в качестве реагентов отходов смежных производств – щелоков нефтехимического синтеза и газовой серы [12]. В качестве удобрений для органического земледелия рассматривается перспектива использования хвостов обогащения фосфоритов [13].

Значительное количество примесей  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SiO}_2$ , содержащееся в фосфоритах, усугубляет их недостатки. Например, систематическое применение удобрений на их основе может привести к накоплению  $\text{Fe}^{3+}$  в почве. В их присутствии внесение расчетного количества водорастворимых удобрений, например,  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  ( $\text{PP} = 1-10^{-3}$ ) будет сопровождаться образованием цитраторастворимых фосфатов, в частности,  $\text{FePO}_4$  ( $\text{PP} = 1,30-10^{-22}$ ) [14, 15], а, следовательно, потерей целевого компонента вследствие снижения содержания его водорастворимой формы. Необходимую доступность фосфора растениям можно обеспечить лишь увеличением кислотности почвы, что неприемлемо для многих культур. Поэтому наличие полуторных оксидов в составе удобрения ограничивает область их применения.

Вследствие избыточного содержания алюминия и железа в почве отмечается их накопление растениями [16]. Кислотные свойства ионов металлов в большей мере проявляют ионы  $Fe^{3+}$ , что обусловлено их способностью к образованию гидросокомплексов, сопровождающееся выделением протонов [17].

При избыточных концентрациях ионы железа образуют хелатоподобные комплексы с обычными метаболитами, нарушая нормальный обмен веществ, взаимодействуют с клеточными мембранами, изменяя их проницаемость и вызывая разрыв. На поглощение и перенос железа в растениях влияет ряд факторов, из которых наиболее значимыми являются: pH, содержание кальция и фосфора, а также соотношение некоторых тяжёлых металлов. Установлено, что растения, хорошо обеспеченные питательными веществами, в частности, кальцием и кремнием, устойчивы к воздействию очень высоких концентраций железа [18].

Для разработки рациональной технологии получения МКФ, повышения его качества и расширения ассортимента продуктов на его основе рассматривается перспектива очистки  $Ca(H_2PO_4)_2$  от нежелательных примесей.

Целью настоящего исследования являлось исследование возможности повышения качества и расширения ассортимента продуктов на основе технического монокальцийфосфата с помощью удаления  $Fe^{3+}$  методом перекристаллизации.

### Объекты и методы исследования

Экономическая и экологическая значимость получения фосфорных удобрений на основе низкосортных фосфоритов повышается благодаря применению схемы с рециклом маточного раствора.

В связи с этим исходными объектами исследования являлись образцы технического монокальцийфосфата (МКФ<sub>т</sub>), полученные по рециркуляционной технологии солянофосфорнокислотным разложением Вятско-Камского фосфорита, состав которого представляет собой (масс. %):  $P_2O_5$  – 21,7, CaO – 38,58, MgO – 0,45,  $Fe_2O_3$  – 3,99,  $Al_2O_3$  – 3,07,  $SiO_2$  – 14,3, прочие примеси – 10,1 [19]. Количественное определение  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  и  $Fe^{3+}$  осуществляли стандартным комплексонометрическим методом [20], фосфора (в пересчёте на  $P_2O_5$ ) – фотоколориметрическим.

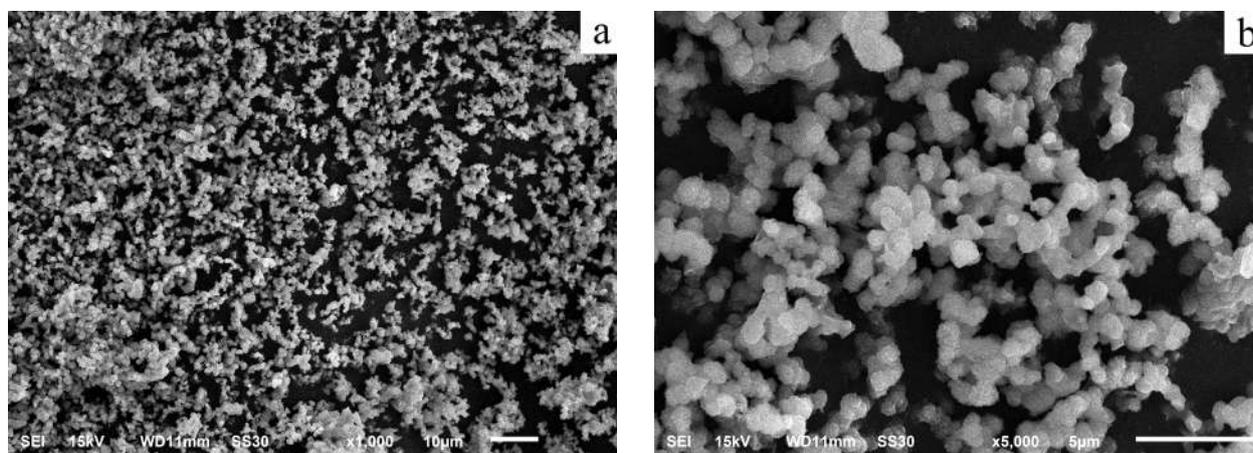
Статистическая обработка результатов химического анализа 28 образцов МКФ<sub>т</sub> с инертной примесью позволила получить его усреднённый состав, представляющий собой:  $P_2O_5$  = 35±5 масс. %, CaO = 28,8±1,2 масс. %, MgO = 1,6±1,3 масс. %,  $Fe_2O_3$  = 1,6±0,8 масс. % [21]. Морфологию образцов МКФ<sub>т</sub> и продуктов на его основе исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Теоретическая возможность очистки технического МКФ от примесей, экстрагируемых из Вятско-Камского фосфорита, оценивалась в сопоставлении с литературными данными, представленными в таблице [14, 15].

Из таблицы следует, что с увеличением производства растворимости (ПР) вещества растёт потребность в увеличении концентрации ионов  $OH^-$  для достижения полного осаждения. Зависимость растворимости ортофосфатов железа, алюминия и гидрофосфата кальция от pH имеет ярко выраженный характер, что объясняется присутствием аниона сравнительно слабой кислоты в составе солей. Следовательно, от pH раствора этих солей зависит не только факт выпадения осадка, но и полнота их осаждения, что делает возможным разделение ионов. Так, полное осаждение соли с низким ПР может быть достигнуто даже в сильнокислой среде, например, в условиях

Таблица / Table  
Произведения растворимости (ПР) соединений в техническом монокальцийфосфате без балластной примеси / Solubility product (SP) of compounds in technical monocalcium phosphate without ballast impu

Компонент Component	ПР IP	$pPP = -lgPP$ $pIP = -lgIP$	Растворимость, г · моль/л Solubility, g · mol/L
$Ca(H_2PO_4)_2$	$1 \cdot 10^{-3}$	3	$8,3 \cdot 10^{-5}$
$Mg_3(PO_4)_2$	$1 \cdot 10^{-13}$	13	$1,54 \cdot 10^{-15}$
$AlPO_4$	$5,75 \cdot 10^{-19}$	18,24	$2,87 \cdot 10^{-19}$
$FePO_4$	$1,30 \cdot 10^{-22}$	21,89	$6,5 \cdot 10^{-23}$
$Ca_3(PO_4)_2$	$2,0 \cdot 10^{-29}$	28,7	$7,69 \cdot 10^{-31}$



**Рис. 1.** Микрофотографии осадков, выделенных из растворов технического монокальцийфосфата после перекристаллизации: а)  $\times 1,000$ , б)  $\times 5,000$

**Fig. 1.** Micrographs of sediments isolated from technical monocalcium phosphate solutions after recrystallization: a)  $\times 1,000$ , b)  $\times 5,000$

получения монокальцийфосфата по рециркуляционной технологии при  $\text{pH} \leq 0,5$ . Поэтому содержащиеся в маточном растворе  $\text{FePO}_4$ ,  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  и  $\text{AlPO}_4$  способны выпасть в осадок [22].

### Результаты и обсуждение

Образцы технического продукта после 28 циклов эксперимента, представляющие собой кристаллогидрат монокальцийфосфата, промывали расчётным количеством воды и последующей фильтрацией очищали от балластной примеси, представленной, в основном, диоксидом кремния со структурой альфа-кварца. Полученный раствор, насыщенный монокальцийфосфатом, направлялся на перекристаллизацию, которая проводилась за счёт упаривания растворителя с уменьшением объёма в 2 раза, при  $100^\circ\text{C}$  на водяной бане.

В процессе перекристаллизации продукта после каждой стадии рециркуляционного процесса получения МКФ наблюдалось систематическое выделение осадков. С помощью метода СЭМ установлено, что осадки представляют собой частицы сферической формы с узким распределением по размерам ( $\approx 1$  мкм). На рисунке 1 (а, б) представлены микрофотографии осадков.

Из результатов химического анализа МКФ<sub>т</sub> видно, что среднее значение  $\text{P}_2\text{O}_5$  в нём соответствует показателям обогащённого суперфосфата  $\approx 35$  масс. %.

На рисунках 2, 3 (см. цв. вкладку II) представлено содержание целевого компонента и примеси железа, соответственно, в серии об-

разцов технического и очищенного продукта (МКФ<sub>о</sub>), в котором содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  увеличилось с  $35 \pm 5\%$  до  $47 \pm 5\%$ , и соответствует качеству двойного суперфосфата.

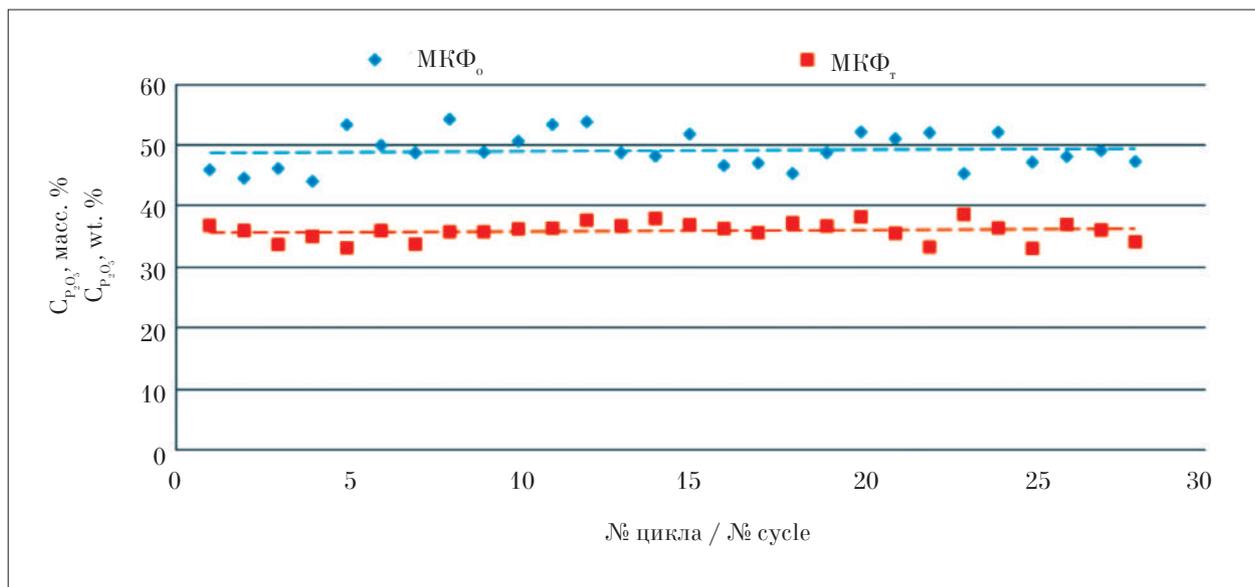
Кроме того, содержание  $\text{Fe}^{3+}$  после одноступенчатой изотермической перекристаллизации МКФ<sub>т</sub> снижено до  $0,05 \pm 0,04$  масс. %, что минимизирует потери подвижной формы  $\text{P}_2\text{O}_5$  вследствие реакции ретроградации фосфора из  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  в  $\text{FePO}_4$ .

### Заключение

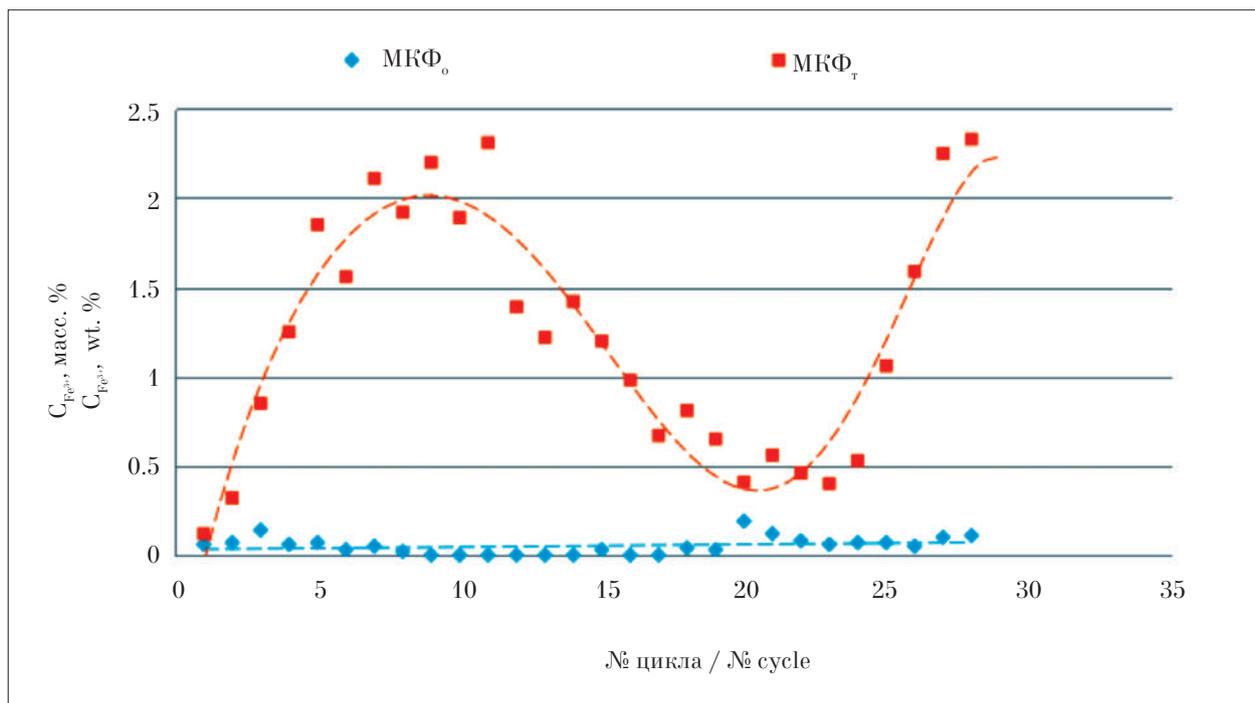
Систематические исследования процесса очистки образцов технического монокальцийфосфата на базе бедного фосфорита Вятско-Камского месторождения от примесей железа методом одноступенчатой перекристаллизации показали возможность получения продукта с содержанием  $\text{P}_2\text{O}_5$   $47 \pm 5$  масс. %, соответствующего качеству двойного суперфосфата (ГОСТ 16306-80). Удаление примесей железа до следовых количеств  $0,05 \pm 0,04$  масс. % позволяет использовать удобрение на закрытых грунтах тепличных хозяйств, исключая риски накопления в них токсичных компонентов и, обеспечивая подвижную форму фосфора, доступную для растений. Очищенный монокальцийфосфат соответствует требованиям, предъявляемым к продуктам «зелёной» химии.

*Инструментальные исследования образцов проводили с привлечением оборудования Центра коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева по государственному контракту № 13.ССР.21.0009.*

**И. А. Почиталкина, И. М. Костанов, И. Б. Сибирякова**  
**«Повышение качества и расширение ассортимента продуктов**  
**на основе технического монокальцийфосфата». С. 135.**



**Рис. 2.** Содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> масс. % в техническом монокальцийфосфате (МКФ<sub>Т</sub>) и очищенном продукте (МКФ<sub>0</sub>)  
**Fig. 2.** P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> wt. % content in technical monocalcium phosphate (МКФ<sub>Т</sub>) and purified product (МКФ<sub>0</sub>)



**Рис. 3.** Содержание Fe<sup>3+</sup> масс. % в техническом монокальцийфосфате (МКФ<sub>Т</sub>) и очищенном продукте (МКФ<sub>0</sub>)  
**Fig. 3.** Fe<sup>3+</sup> wt. % content in technical monocalcium phosphate (МКФ<sub>Т</sub>) and purified product (МКФ<sub>0</sub>)

## Литература

1. Ставцев А.Н., Алпатов А.В., Новоселов Е.А. Тенденции развития российского рынка минеральных удобрений // Экономика, труд, менеджмент в сельском хозяйстве. 2021. № 8 (77). С. 65–71.

2. Алтухов А.И., Сычев В.Г., Винничек Л.Б. Развитие производства и рынка минеральных удобрений // Плодородие. 2019. № 3 (108). С. 6–9.

3. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Гамзиков Г.П. Агрохимия. Москва: Изд-во ВНИИА им. Д.Н.Прянишникова, 2017. 854 с.

4. Шаймарданова М.А., Меликулов Г.Е., Хужамбердиев Ш.М., Мырзакулов Х.Ч. Технология получения кормового монокальцийфосфата из фосфоритов центральных Кызылкумов // Universum: технические науки. 2021. № 10-4 (91). С. 67–72.

5. Хузиахметов Р.Х., Губайдуллина А.М., Бреус И.П. Технология фосфорных и комплексных удобрений из низкокачественных фосфоритов различных месторождений // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 6. С. 106–112.

6. Исследовательская группа INFOMINE [Электронный ресурс] <https://infomine.ru/files/demo.pdf> (Дата обращения: 20.03.2023).

7. Павлов Н.Н. Неорганическая химия. М.: Высшая школа, 1986. 336 с.

8. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. 584 с.

9. Воробьев Н.И. Технология фосфорных и комплексных удобрений. Минск: БГТУ, 2015. 177 с.

10. Петропавловский И.А., Почиталкина И.А., Киселев В.Г., Кондаков Д.Ф., Свешникова Л.Б. Оценка возможности обогащения и химической переработки некондиционного фосфатного сырья на основе изучения химического и минералогического состава // Химическая промышленность сегодня. 2012. № 4. С. 5–8.

11. Петропавловский И.А., Почиталкина И.А., Киселев В.Г., Ахназарова С.Л., Мырзахметова Б.Б. Получение монокальцийфосфата из бедного фосфатного сырья жидкофазным рециркуляционным способом // Химическая технология. 2012. Т. 13. № 8. С. 453–456.

12. Хузиахметов Р.Х., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Иванова Н.Н. Комплексная переработка природных фосфоритов с использованием щелочных отходов нефтехимического синтеза и сернистого газа // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 102–108.

13. Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я., Богатырева Н.Н., Кантор Г.Я. Перспективы использования хвостов обогащения фосфоритов в качестве удобрений для органического земледелия // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 1. С. 160–166.

14. Крешков А.П., Ярославцев А.А. Курс аналитической химии. Количественный анализ. М.: Химия, 1982. 312 с.

15. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии. М.: Химия, 1989. 448 с.

16. Пасынков А.В., Светлакова Е.В., Пасынкова Е.Н. Влияние длительного применения минеральных удобрений на содержание алюминия, марганца и железа в дерново-подзолистой почве // Реализация методологических и методических идей профессора Б.А. Доспехова в совершенствовании адаптивно-ландшафтных систем земледелия: материалы Международной научно-практической конференции. Коллективная монография. Т. 1. М.: Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2017. С. 285–289.

17. Мотузова Г.В., Макарычев И.П., Петров М.И. Влияние ионов железа, ртути, меди на кислотно-основные свойства водных вытяжек из почв // Вестник Московского университета. 2011. № 4. С. 26–31.

18. Пироговская Г.В., Милоста Ю.Г. Влияние комплексных удобрений с добавками железосодержащих соединений на поступление железа в почву и растения льна масличного, урожайность и качество семян // Почвоведение и агрохимия. 2020. № 1 (64). С. 190–204.

19. Шмелёва А.А., Сибирякова И.Б., Костанов И.М. Определение состава бедного фосфатного сырья // Проблемы развития технического потенциала и направления его повышения: сб. статей по итогам Международной научно-практической конференции. Стерлитамак: АМИ, 2021. С. 86–89.

20. Васильев В.П., Морозова Р.П., Кочергина Л.А. Аналитическая химия. Лабораторный практикум. М.: Дрофа, 2006. 414 с.

21. Сибирякова И.Б., Костанов И.М., Почиталкина И.А. Получение  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  рециркуляционным способом из низкокачественных природных фосфатов // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35. № 6 (241). С. 101–102.

22. Алексеев В.Н. Количественный анализ. М.: Химия, 1972. 504 с.

## References

1. Stavtsev A.N., Alpatov A.V., Novoselov E.A. Trends in the development of the Russian mineral fertilizers market // Economy, labor, management in agriculture. 2021. No. 8 (77). P. 65–71 (in Russian). doi: 10.33938/218-65

2. Altukhov A.I., Sychev V.G., Vinnichuk L.B. Development of production and market of mineral fertilizers // Plodorodie. 2019. No. 3 (108). P. 6–9 (in Russian). doi: 10.25680/S19948603.2019.108.02

3. Mineev V.G., Sychev V.G., Gamzikov G.P. Agrochemistry. Moskva: Publishing house of VNIIA named after D.N. Pryanishnikov, 2017. 854 p. (in Russian).

4. Shaimardanova M.A., Melikulova G.E., Khuzhamberdiev Sh.M., Mirzakulov H.H. Technology of obtaining feed monocalcium phosphate from phosphorites of central Kyzylkum // Universum: technical sciences. 2021. No. 10–4 (91). P. 67–72 (in Russian). doi: 10.32743/UniTech.2021.91.10.12471

5. Khuziakhmetov R.H., Gubaidullina A.M., Breus I.P. Technology of phosphorus and complex fertilizers from low-quality phosphorites of various deposits // Bulletin of Kazan Technological University. 2009. No. 6. P. 106–112 (in Russian).
6. INFOMINE Research Group [Internet resource] <https://infomine.ru/files/demo.pdf> (Accessed: 20.03.2023) (in Russian).
7. Pavlov N.N. Inorganic chemistry. Moskva: Vysshaya Shkola, 1986. 336 p. (in Russian).
8. Yagodin B.A., Zhukov Yu.P., Kobzarenko V.I. Agrochemistry. Moskva: Kolos, 2002. 584 p. (in Russian).
9. Vorobyov N.I. Technology of phosphorous and complex fertilizers. Minsk: BSTU, 2015. 177 p. (in Russian).
10. Petropavlovskiy I.A., Pochitalkina I.A., Kiselev V.G., Kondakov D.F., Sveshnikova L.B. Assessment of the possibility of enrichment and chemical processing of substandard phosphate rock based on the study of chemical and mineralogical composition // Khimicheskaya promyshlennost segodnya. 2012. No. 4. P. 5–8 (in Russian).
11. Petropavlovskiy I.A., Pochitalkina I.A., Kiselev V.G., Akhnazarova S.L., Myrzakhmetova B.B. Production of monocalcium phosphate from poor phosphate raw materials by liquid-phase recirculation method // Khimicheskaya tekhnologiya. 2012. V. 13. No. 8. P. 453–456 (in Russian).
12. Khuziakhmetov R.H., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Ivanova N.N. Complex processing of natural phosphorites using alkaline wastes of petrochemical synthesis and gas sulfur // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 102–108 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-102-108
13. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Prospects of 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
14. Kreshkov A.P., Yaroslavtsev A.A. Course of analytical chemistry. Quantitative analysis. Moskva: Khimiya, 1982. 312 p. (in Russian).
15. Lurie Yu.Yu. Analytical chemistry handbook. Moskva: Khimiya, 1989. 448 p. (in Russian).
16. Pasyнков A.V., Svetlakova E.V., Pasynkova E.N. The effect of long-term use of mineral fertilizers on the content of aluminum, manganese and iron in sod-podzolic soil // Realization of methodological and methodological ideas of Professor B.A. Dospekhov in improving adaptive-landscape farming systems: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Collective monograph. V. 1. Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet – MSKhA im. K.A. Timiryazeva, 2017. P. 285–289 (in Russian).
17. Motuzova G.V., Makarichev I.P., Petrov M.I. Influence of iron, mercury, copper ions on acid-base properties of water-extracts from soils // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 17: Pochvedenie. 2011. No. 4. P. 26–31 (in Russian).
18. Pirogovskaya G.V., Milosta Yu.G. The effect of complex fertilizers with addition of iron-containing compounds on the intake of iron into the soil and oilseed flax plants // Soil science and Agrochemistry. 2020. No. 1. P. 190–204 (in Russian).
19. Shmeleva A.A., Sibiryakova I.B., Kostanov I.M. Determination of the composition of poor phosphate raw materials // Problems of development of technical potential and directions of its improvement: sbornik statey po itogam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sterlitamak: AMI, 2021. P. 86–89 (in Russian).
20. Vasiliev V.P., Morozova R.P., Kochergina L.A. Analytical chemistry. Laboratory workshop: a textbook for universities. Moskva: Drofa, 2006. 414 p. (in Russian).
21. Sibiryakova I.B., Kostanov I.M., Pochitalkina I.A. Getting  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$  recirculating method of low-quality natural phosphates // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2021. V. 35. No. 6 (241). P. 101–102 (in Russian).
22. Alekseev V.N. Quantitative analysis. Moskva: Khimiya, 1972. 504 p. (in Russian).

## Исследование интегральной токсичности почвы, загрязнённой нефтепродуктами

© 2023. Ю. Н. Курбатов<sup>1</sup>, аспирант,  
Т. А. Трифонова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых,  
600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, д. 87,  
<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
119991, Россия, г. Москва, ул. Колмогорова, д. 1,  
e-mail: iur.curbatov@gmail.com, tatrifon@mail.ru

Исследовано влияние загрязнения техническим отработанным маслом на интегральную токсичность дерново-подзолистой супесчаной почвы в условиях полевого эксперимента. Интегральную токсичность водной вытяжки почвы определяли с помощью бактериального теста «Эколюм», представляющего собой люминесцентные генно-инженерные бактерии *Escherichia coli*; контрольные образцы почвы показывают допустимый уровень токсичности; почвы, загрязнённые дозами нефтепродуктов 10 и 20 г/кг, среднетоксичны; доза 30 г/кг делает почву высокотоксичной для люминесцентных микроорганизмов. Определён углеводородный состав отработанного масла с использованием спектральных коэффициентов, полученных методом ИК-спектрометрии; выявлено высокое содержание ароматических углеводородов (наиболее токсичной фракции) – 6,73%. Корреляционный анализ между показателем токсичности почвы, содержанием в ней нефтепродуктов, тяжёлых металлов (Co, Ni, Cu, Zn, Pb) и pH водной вытяжки показал очень сильную положительную корреляционную зависимость между токсичностью и содержанием в почве цинка ( $r = 0,88$ ) и нефтепродуктов ( $r = 0,83$ ), а также высокую отрицательную зависимость в отношении pH почвы ( $r = -0,61$ ). Определена фитомасса растений, произраставших на загрязнённых площадках. Очень высокая обратная корреляционная зависимость ( $r = -0,82$ ) между содержанием нефтяных углеводородов в почве и фитомассой подтверждает, что загрязнение почв повышенной дозой нефтепродуктов снижает накопление биомассы надземной частью растений. Для загрязнённых почв наблюдалась общая тенденция к вытеснению однодольных растений и замещению их двудольными.

**Ключевые слова:** интегральная токсичность почвы, отработанное масло, углеводородный состав, тяжёлые металлы, фитомасса.

## The study of the integral toxicity of oil-contaminated soil

© 2023. Yu. N. Kurbatov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-0904-3854<sup>†</sup>  
Т. А. Trifonova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-1628-9430<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Vladimir State University,  
87, Gorkogo St., Vladimir, Russia, 600000,  
<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
1, Kolmogorova St., Moscow, Russia, 119991,  
e-mail: iur.curbatov@gmail.com, tatrifon@mail.ru

The effect of contamination with technical waste oil on the integral toxicity of sod-podzolic sandy loam soil under field experiment conditions was studied. The integral toxicity of the soil aqueous extract was determined using the «Ecolum» bacterial test, which is a luminescent gene-engineered *Escherichia coli*. Control soil samples show acceptable levels of toxicity. Soils contaminated with 10 or 20 g/kg doses of petroleum products are moderately toxic. The dose of 30 g/kg makes the soil highly toxic for luminescent microorganisms. The hydrocarbon composition of technical waste oil was determined using spectral coefficients obtained by infrared spectrometry. High content – 6.73% – of aromatic hydrocarbons (the most toxic fraction) was revealed. Correlation analysis between the soil toxicity index, the content of oil products, heavy metals (Co, Ni, Cu, Zn, Pb) and the pH of the soil aqueous extract showed a very strong positive correlation between toxicity and zinc content ( $r = 0.88$ ) and oil products content ( $r = 0.83$ ) in the soil, as well as a high negative correlation on soil pH ( $r = -0.61$ ). The phytomass of plants growing on contaminated sites was determined. A very high inverse correlation ( $r = -0.82$ ) between the content of oil hydrocarbons in the soil and phytomass confirms

that soil contamination with an increased dose of oil products reduces the biomass of the aboveground part of plants. A general tendency to displacement of monocots and their replacement by dicots was observed for polluted soils.

**Keywords:** integrated soil toxicity, waste oil, hydrocarbon composition, heavy metals, phytomass.

В настоящее время загрязнение почвы нефтепродуктами (НП) является особенно актуальной проблемой в России. Результаты исследований, опубликованные Росгидрометом в обзоре 2021 г., свидетельствуют о высоком уровне загрязнения нефтяными углеводородами изученных территорий. Представлен отчёт о содержании нефтепродуктов в пробах почв на территориях Западной Сибири, Республик Татарстан, Удмуртской и Чувашской Республики, а также Иркутской, Нижегородской, Оренбургской и Самарской областей вблизи наиболее вероятных мест импактного загрязнения. Установлено, что содержание нефтепродуктов в почвах городов Казани, Нижнекамска, Самары, Нижнего Новгорода, Дзержинска и Чебоксары превышает фоновый уровень в 3–8 раз; максимальные концентрации НП в ряде случаев показывают превышение фона до 47 раз. Огромное количество нефтепродуктов выявлено в почвах г. Глазова Удмуртской Республики. Среднее содержание НП составило 1351 мг/кг, что превышает фоновое значение в 48 раз, а максимальные концентрации доходят до 9727 мг/кг, превышая фоновое значение в 345 раз [1].

Масштабное загрязнение почв и вод отработанными автомобильными маслами обусловлено недостаточностью мер по их сбору и утилизации. Из ежегодно образующихся в России 500 тыс. т отработанных масел, около 60% нелегально сбрасываются на почву и в водоёмы, 40–48% собирается, из этого количества 26–33% масел используется в качестве жидкого топлива. Однако в таком случае возникает новая проблема – загрязнение атмосферы продуктами сгорания углеводородов. Наиболее приоритетным направлением утилизации считается регенерация масел и их повторное использование. Подобной переработке подвергаются лишь 14–15% собранных моторных масел. К сожалению, в настоящий момент проблема утилизации усложняется ещё и неселективным характером сбора отработанных масел, что делает процесс регенерации достаточно дорогостоящим и технологически сложным [2].

Изучение влияния почв, загрязнённых нефтепродуктами и тяжёлыми металлами (ТМ), на почвенную микробиоту и растительный покров, а также оценка потенциального риска

для здоровья человека в настоящий момент активно проводятся российскими и зарубежными исследователями [3–7].

С целью исследования интегральной токсичности почв используют простейших (*Paramecium caudatum*), беспозвоночных животных (*Dafnia magna*, *Ceriodaphnia affinis*), бактерии (*Vibrio fischeri*) [8–11], а также фитотестирование [12]. В настоящее время в России широкое распространение приобрела методика измерения интегрального показателя токсичности с помощью бактериального теста «Эколюм», представляющего собой люминесцентные генно-инженерные бактерии *Escherichia coli*. Методика основана на определении изменения интенсивности биолюминесценции бактерий в зависимости от содержания в анализируемой пробе химических веществ-токсикантов по сравнению с контролем.

Целью работы было изучить интегральную токсичность почв, загрязнённых отработанными маслами, а также оценить влияние на этот показатель сопутствующих поллютантов, таких как тяжёлые металлы.

### Объекты и методы исследования

Для изучения интегральной токсичности почвы, загрязнённой отработанными маслами, на территории Вязниковского района Владимирской области были заложены 8 пробных делянок площадью 1 м<sup>2</sup> каждая. 6 делянок были попарно загрязнены следующими дозами углеводородов: 10, 20 и 30 г НП на 1 кг почвы соответственно. Две оставшиеся площадки служили контролем. Загрязнитель распределялся по поверхности почвы, глубина проникновения – не более 10 см.

В качестве поллютанта использовали отработанное масло для автотракторных дизелей марки М-8ДМ, изготовленное по ГОСТ 8581-78. Расстояние между двумя участками – 8 м. Расстояние между пробными площадками 3–4 м, а между контрольными и опытными делянками – 5 м. Схема опыта представлена на рисунке 1.

Опыты были заложены в 2019 г. На протяжении 3 лет (2019–2021 гг.) в середине августа каждого года отбирали пробы почв с глубины 0–10 см методом конверта по ГОСТ 17.4.3.01-2017. Тип исследуемой почвы –

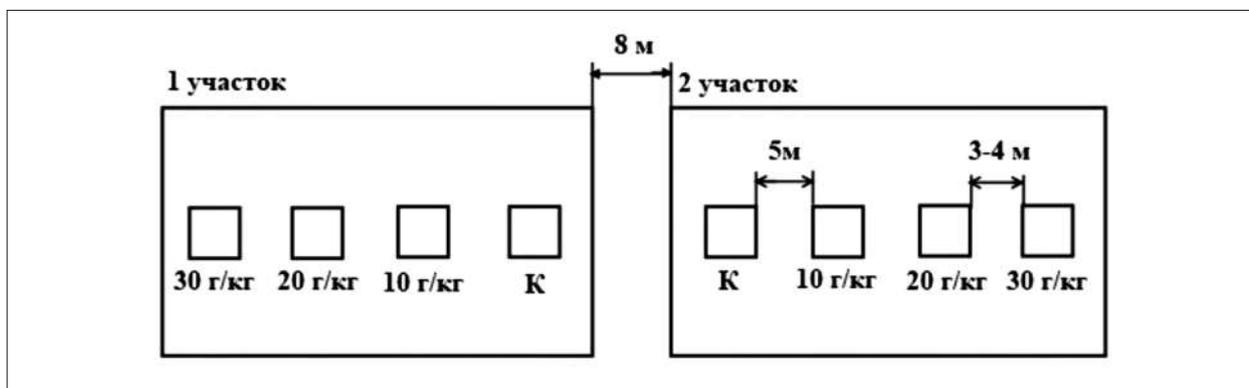


Рис. 1. Схема опыта / Fig. 1. Experience scheme

дерново-подзолистая супесчаная. Массовая доля гумуса на глубине 0–10 см составляет 1,37–1,83%, на глубине 10–20 см – 0,8–1,1%.

Погодные условия в период наблюдения были различными: в 2019 г. и 2021 г. количество осадков значительно превысило среднюю многолетнюю норму, однако по термическому режиму они были наиболее благоприятны. 2020 г., напротив, отличался более высокой среднемесячной температурой (преимущественно за счёт тёплой зимы), а количество выпавших осадков было сравнимо со среднегодовыми.

Анализ углеводородного состава отработанных масел производили на ИК-Фурье спектрометре «ИнфраЛЮМ ФТ-08» по ПУ 03-2002 «Инструкция по проведению и идентификации нефтепродуктов с помощью ИК-Фурье-спектрометра «ИнфраЛЮМ ФТ-02». В процессе эксплуатации моторных масел теряются их первоначальные свойства вследствие загрязнения сажей, продуктами неполного сгорания топлива, частицами износа и т. п. Инфракрасная спектроскопия является одним из самых доступных и информативных методов, позволяющих получить оперативную информацию о текущем состоянии масла. С помощью ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье можно выяснить степень нитрования, сульфирования, сульфатирования, окисления масла, а также оценить содержание в нём противоизносных присадок, сажи, воды и несгоревшего топлива [13].

Концентрацию валовых форм ТМ в анализируемых образцах определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора «Спектроскан Макс-G» по методике М-049-ПДО/18 в двух повторностях для каждой пробы. Пробоподготовка заключалась в измельчении почвы в агатовой ступке с последующим просеиванием через сито. Затем с помощью лабораторного гидравлического

пресса формировалась подложка из борной кислоты, в которую впрессовывалась подготовленная ранее почва; получившуюся «таблетку» подвергали химическому анализу. Кислотность почвенной вытяжки исследовали по ГОСТ 26423-85 с помощью рН-метра Mettler Toledo SevenCompact S220. Для определения интегральной токсичности почв использовали методические рекомендации № 01.019-07 «Определение интегральной токсичности почв с помощью бактериального теста «Эколюм». Методика предусматривает измерение интенсивности биолюминесценции тест-объекта посредством люминометра серии «Биотокс» (ТУ 4389-001-56602627-2005). В качестве тест-объекта используются лиофилизированные люминесцентные генно-инженерные бактерии *E. coli*, входящие в состав биосенсора «Эколюм» (ТУ 2639-236-00209792-01).

Выводы о токсичности пробы делаются на основе изменения интенсивности биолюминесценции бактерий (имп./с) по сравнению с контролем (дистиллированная вода) за 30-минутный период экспозиции (в трёх повторностях для каждой пробы). Уменьшение интенсивности биолюминесценции пропорционально токсическому эффекту «Т», который устанавливает характер ответа биосенсора на токсичность среды и рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{I_0 - I}{I_0} \cdot 100, \tag{1}$$

где  $I_0$  и  $I$  соответственно интенсивность биолюминесценции контроля и опыта.

Методические рекомендации № 01.019-07 предусматривают три пороговых уровня токсичности: допустимый уровень – индекс токсичности  $T$  меньше 20; образец токсичен – индекс  $T$  равен или больше 20, но меньше 50; высокая токсичность образца – индекс  $T$  равен или больше 50.

Используемый набор спектральных коэффициентов  
The set of spectral coefficients used

Формула расчёта спектральных коэффициентов Formula for calculating spectral coefficients	Характеристика спектральных коэффициентов Characterization of spectral coefficients
$C_{ар} = D_{1600}/D_{720}$	условное содержание ароматических структур conditional content of aromatic structures
$C_{ал} = (D_{720} + D_{1380})/D_{1600}$	условное содержание алифатических структур conditional content of aliphatic structures
$C_p = D_{1380}/D_{720}$	коэффициент разветвлённости структур branching coefficient of structures
$C_{ок} = D_{1710}/D_{1460}$	коэффициент окисления / oxidation coefficient
$C_c = D_{1030}/D_{1460}$	коэффициент сульфирования / sulfonation coefficient
$C_{сф} = D_{1150}/D_{1460}$	коэффициент сульфатирования / sulfation coefficient
$C_n = D_{1630}/D_{1460}$	коэффициент нитрования / nitration coefficient

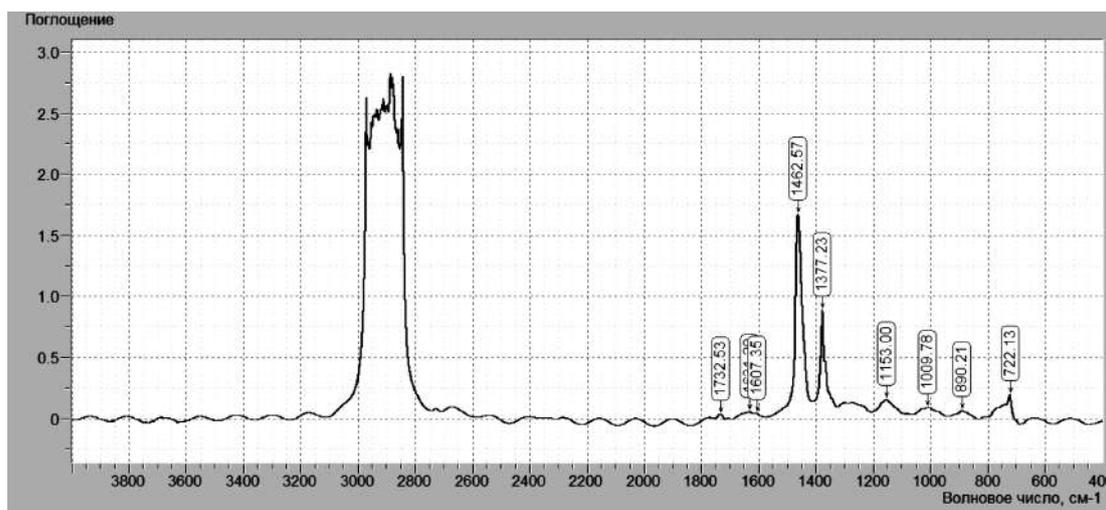


Рис. 2. ИК-спектр отработанного масла с основными характеристическими полосами поглощения  
Fig. 2. IR spectrum of waste oil with main characteristic absorption bands

Статистическую обработку данных проводили в программе Microsoft Office Excel.

### Результаты и обсуждение

На начальном этапе исследования был определён состав поллютанта – отработанного масла. На основании интенсивности поглощения ИК-излучения различными функциональными группами, составляющими углеродный скелет НП, были рассчитаны спектральные коэффициенты, представляющие собой отношения оптических плотностей характеристических полос поглощения различных типов связей: коэффициенты ароматичности (1600, 870, 810 и 750 см<sup>-1</sup>), алифатичности (720, 1380 и 1460 см<sup>-1</sup>) и разветвлённости, а также степени окисления (1710 см<sup>-1</sup>), сульфирования (1030 см<sup>-1</sup>),

сульфатирования (1150 см<sup>-1</sup>) и нитрования (1630 см<sup>-1</sup>) масел в ходе эксплуатации. Перечень определённых спектральных коэффициентов представлен в таблице 1.

ИК-спектр отработанных масел снимался в спектральном диапазоне 4000–400 см<sup>-1</sup> методом жидкой плёнки (0,05 мм) в неразборной кювете. Интерферограмма, полученная в ходе исследования, представлена на рисунке 2.

Так же был определён процентный состав алкановых, нафтеновых, ареновых и окисленных структур, входящих в состав отработанного масла по следующим формулам [14]:

$$\%A_l = \frac{D_{1460} + D_{1380} + D_{720}}{\sum D} \cdot 100, \quad (2)$$

$$\%H = \frac{D_{1030} + D_{960}}{\sum D} \cdot 100, \quad (3)$$

$$\%Ap = \frac{D_{1600} + D_{870} + D_{810} + D_{750}}{\sum D} \cdot 100, \quad (4)$$

$$\%Ok = \frac{D_{1710}}{\sum D} \cdot 100, \quad (5)$$

где *Al* – алканы, *H* – нафты, *Ap* – арены и *Ok* – окисленные структуры; *D* – оптическая плотность характеристических полос поглощения различных типов связей, определяемая для волнового числа, указанного в индексе.

Структурный состав углеводородов и рассчитанные спектральные коэффициенты представлены в таблице 2.

Согласно полученным данным, в отработанном масле, использованном нами в качестве поллютанта, обнаруживаются преимущественно алифатические углеводороды в виде алканов (87,36%). Циклоалканы, или нафты, составляют малую часть отработанного масла (4,73%). Содержание ароматических углеводородов (наиболее токсичной фракции) довольно высокое – 6,73%. Кроме

Таблица 2 / Table 2

Структурный состав углеводородов отработанного масла и спектральные коэффициенты поглощения ИК-излучения  
Waste oil hydrocarbons structure and IR radiation spectral absorption coefficients

Спектральные коэффициенты Spectral coefficients						Содержание структурных групп, % Content of structural groups, %				
<i>C<sub>ар</sub></i>	<i>C<sub>ал</sub></i>	<i>C<sub>р</sub></i>	<i>C<sub>ок</sub></i>	<i>C<sub>с</sub></i>	<i>C<sub>эф</sub></i>	<i>C<sub>н</sub></i>	арены arenas	алканы alkanes	нафты naphthenes	окисленные oxidised
0,23	23,88	4,55	0,02	0,05	0,09	0,03	6,73	87,36	4,73	1,18

Таблица 3 / Table 3

Динамика изменения показателей интегральной токсичности, pH и содержания тяжёлых металлов в почве за трёхлетний период наблюдений  
The dynamics in indicators of integral toxicity, pH and heavy metal content in soil over a three-year period

Доза загрязнения почвы НП, г/кг Oil contamination dose, g/kg	Интегральный показатель токсичности «Т» Integral toxicity indicator “T”	pH	Концентрация тяжёлых металлов, мг/кг Heavy metal content, mg/kg				
			Co	Ni	Cu	Zn	Pb
2019							
K	10,2	6,8	<b>10,9±4,8</b>	<b>29,4±5,1</b>	25,3±15,5	<b>59,4±5,4</b>	16,9±10,7
10	<b>35,7</b>	6,8	<b>11,4±4,8</b>	<b>32,1±5,3</b>	22,4±15,2	<b>101,3±7,1</b>	17,5±10,7
20	<b>37,8</b>	6,8	<b>10,5±4,7</b>	<b>32,2±5,3</b>	15,3±14,5	<b>99,1±7,0</b>	19,2±10,8
30	<b>37,6</b>	6,7	<b>10,7±4,8</b>	<b>30,2±5,1</b>	6,3±13,6	<b>114,0±7,6</b>	16,6±10,7
2020							
K	14,4	6,8	<b>11,3±4,8</b>	<b>30,5±5,1</b>	<b>49,6±18,0</b>	<b>62,3±5,5</b>	22,2±10,9
10	<b>48,3</b>	6,9	<b>11,0±4,8</b>	<b>31,0±5,2</b>	<b>41,6±17,2</b>	<b>85,2±6,4</b>	19,0±10,8
20	<b>44,2</b>	6,7	<b>10,8±4,8</b>	<b>31,6±5,2</b>	26,1±15,6	96,7±6,9	19,3±10,8
30	<b>57,9</b>	6,6	<b>11,0±4,8</b>	<b>28,7±5,0</b>	17,3±14,7	158,5±9,3	20,0±10,8
2021							
K	5,2	6,8	<b>12,1±4,8</b>	<b>33,9±5,4</b>	<b>58,9±18,9</b>	<b>63,7±5,6</b>	22,6±10,9
10	<b>41,5</b>	6,8	<b>11,8±4,8</b>	<b>34,2±5,4</b>	<b>43,3±17,3</b>	<b>96,7±6,9</b>	20,7±10,8
20	<b>43,7</b>	6,6	<b>11,0±4,8</b>	<b>37,1±5,6</b>	<b>67,8±19,8</b>	<b>111,1±7,4</b>	20,0±10,8
30	<b>64,4</b>	6,3	<b>11,3±4,8</b>	<b>32,4±5,3</b>	29,4±15,9	<b>167,8±9,7</b>	20,6±10,8
ПДК* или ОДК** тяжёлых металлов MPC* or APC** for heavy metals			5,0*	20,0**	33,0**	55,0**	32,0*

Примечание: жирным шрифтом отмечены показатели, превышающие значение ПДК или ОДК тяжёлых металлов для дерново-подзолистых супесчаных почв, а также показатель интегральной токсичности «Т», относящийся к категориям «образец токсичен» и «образец высокотоксичен».

Note: indicators in bold type are those exceeding the MPC or APC value of heavy metals for sod-podzolic sandy loam soils, as well as the integral toxicity indicator “T” in “sample toxic” and “sample highly toxic” categories.

того, спектральный анализ позволил выявить процессы, свидетельствующие о потере маслом своих первоначальных свойств – углеводов подверглись окислению, сульфированию, сульфатированию и нитрованию.

В ходе исследования были проанализированы следующие показатели почв, отобранных с контрольных и опытных площадок за три года наблюдений (2019–2021): интегральный показатель токсичности и рН водной вытяжки проб, а также содержание в почвах ТМ (Co, Ni, Cu, Zn, Pb). Предельно допустимые концентрации и ориентировочно допустимые концентрации ТМ в почве были взяты из СанПиН 1.2.3685-21. Усреднённые данные для параллельных опытов с двух участков представлены в таблице 3.

**Интегральный показатель токсичности.** Показатель токсичности «Т» для контрольных проб находится в пределах допустимого уровня ( $T < 20$ ), тогда как нефтезагрязнённые почвы по этому критерию разнятся.

Почва на участках, загрязнённых НП с дозой 10 г/кг, в целом имеет средний уровень токсичности, однако, в 2019 г. наблюдался самый низкий уровень этого показателя. В 2020 г. токсичность почвы повысилась на 26% по сравнению с предыдущим годом, а в 2021 г. вновь снизилась на 16,5%.

Почвы, загрязнённые НП в дозе 20 г/кг, также оказывают среднетоксичное воздействие на тест-объект, в течение всего времени наблюдения интегральный показатель «Т» находился в диапазоне 37,8–44,2.

Сильно загрязнённые НП почвы (30 г/кг) в первый год наблюдений показывали средний уровень токсичности, который с каждым последующим годом возрастал на 35% (57,9 в 2020 г.) и 10% (64,4 в 2021 г.), что соответствует высокому уровню токсичности. Такой эффект может быть обусловлен высоким содержанием в исследуемом отработанном масле ароматических углеводов (почти 7%). Это могут быть полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), в том числе канцерогенные, например, бенз[а]пирен, которые могут составлять до 4% от общей массы НП, на что указывают некоторые авторы [15]. При нефтезагрязнении в почве могут обнаруживаться и другие группы ПАУ, а именно: дифенил, флуорен, фенантрен, пирен и т. п., что также может угнетать жизнедеятельность тест-объекта [16].

**Водородный показатель.** По уровню значений рН почвы в контроле имеют нейтральные показатели, в случае с опытными пробами – значения водородного показателя

приобретают более кислую реакцию пропорционально увеличению дозы нефтепродуктов, внесённых в почву.

**Содержание тяжёлых металлов.** Превышение значений ПДК или ОДК было выявлено для кобальта, никеля, меди и цинка, содержание свинца – ниже ПДК как в контрольных пробах, так и в опыте.

Фоновое содержание ТМ в контрольных почвах варьирует следующим образом: превышение ПДК по кобальту в 2,2–2,4 раза, по никелю – 1,5–1,7 раза, по меди – до 1,8 раза, по цинку – незначительно – до 1,2 раза.

Содержание кобальта в загрязнённых почвенных пробах в течение трёх лет наблюдений практически не меняется и составляет примерно 2,1–2,4 ПДК. Никель показывает превышение ПДК для почвы в 1,4–1,9 раза на загрязнённых участках. Минимальное содержание меди в исследуемых пробах почвы зафиксировано сразу после внесения нефтепродуктов (показатели ниже ПДК) – в 2019 г. Затем наблюдается постепенное увеличение концентрации меди – на второй год наблюдений в почве с содержанием НП 10 г/кг количество меди увеличилось в 1,3 раза по сравнению со значением ПДК. В 2021 г. зафиксировано резкое увеличение концентрации этого металла в варианте с внесением НП 20 г/кг (до 2 раз относительно ПДК). Содержание НП в почве 30 г/кг способствует резкому снижению концентрации меди сразу после загрязнения и постепенному возрастанию этого показателя к третьему году наблюдений. Таким образом, содержание соединений меди в загрязнённой почве от года к году имеет нестабильные показатели, что указывает на увеличение степени её подвижности в условиях нефтезагрязнения, эта же закономерность прослеживается в исследованиях [17, 18].

Отмечается резкое увеличение концентрации цинка сразу же после добавления поллютанта в почву (превышение ПДК в 1,8–2,1 раза в 2019 г.) и от 1,5 до 3 раз за весь период наблюдений. Повышение концентрации данного элемента в загрязнённой НП почве также отмечалось в условиях полевого исследования [19]. Причиной этому могут служить процессы естественного разложения нефти, на что указывают некоторые авторы [20]. Высокое содержание цинка, выявленное в пробах загрязнённых почв, может быть обусловлено также и тем, что данный металл используется в качестве присадки к маслу, которая снижает износ металлических деталей двигателя. Согласно ГОСТ 8584-78, массовая доля цинксо-

Таблица 4 / Table 4

Фитомасса, собранная с двух пробных участков в середине августа 2019 г.  
Phytomass collected from two trial plots in mid-August 2019

Доза загрязнения Contamination dose	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> / Phytomass, g/m <sup>2</sup>	
	1 участок / 1 plot	2 участок / 2 plot
К (0 г/кг) / К (0 g/kg)	197,6	213,0
10 г/кг / 10 g/kg	83,6	112,8
20 г/кг / 20 g/kg	63,0	92,5
30 г/кг / 30 g/kg	33,5	78,0

держатой присадки в чистом масле составляет не менее 0,09%.

**Накопление поллютантов в растительности.** В течение 2-й половины вегетационного сезона (в середине августа 2019 г.) был произведен укос растений на пробных площадках. Определялся видовой состав растений, их количество и фитомасса.

Всего на участках было зарегистрировано 27 видов высших растений из 12 семейств, многие из которых характеризовались небольшим обилием.

На незагрязнённых площадках преобладали преимущественно однодольные растения. Вейник наземный (*Calamagrostis epigejos*) составлял в среднем 33,5% от общей фитомассы. Меньшую долю занимали василёк луговой (*Centaurea jacea*), бодяк полевой (*Cirsium arvense*) и щавель конский (*Rumex confertus*). Остальные виды сформировали незначительный процент биомассы.

На площадках с дозой внесения НП 30 г/кг преобладающими видами по фитомассе оказались осот полевой (*Sonchus arvensis*) и щавель конский. На участках со средним загрязнением (20 г/кг) преобладали щавель конский, бодяк полевой и василёк луговой (*Centaurea jacea*). Ястребиночка обыкновенная (*Pilosella officinarum*), щавель конский, подмаренник цепкий (*Galium aparine*) и земляника обыкновенная (*Fragaria vesca*) являлись преобладающими видами на площадках с дозой внесения НП 10 г/кг.

Данные по количеству фитомассы представлены в таблице 4.

Для первого участка коэффициент корреляции Пирсона между фитомассой и дозой НП равен  $r = -0,78$ , для второго  $r = -0,82$ . Обратная зависимость между сравниваемыми параметрами доказывает, что с увеличением степени нефтяного загрязнения почв снижается биомасса надземной части растений. Также была обнаружена очень высокая отрицательная корреляция ( $r = -0,98$ ) между концентрацией в почве цинка и фитомассой, что говорит о сильном угнетающем влиянии

на растения повышенного содержания этого элемента. Подобные выводы были сделаны в работе [21], где в качестве поллютанта использовался гальванический шлак приборостроительного завода, содержащий преимущественно цинк и железо (до 80% массовой доли приходилось на эти металлы). В ходе наблюдений за растениями, произрастающими на загрязнённых участках, на начальных этапах трёхлетнего полевого эксперимента исследователями также отмечалось снижение надземной фитомассы.

Для загрязнённых НП площадок наблюдалась общая тенденция к вытеснению однодольных растений двудольными. Очевидно, что это связано со способностью их мощной стержневой корневой системы добывать воду и минеральные соли из нижележащих, незагрязнённых слоёв почвы, тогда как мочковатая корневая система однодольных может испытывать непосредственное негативное влияние со стороны поллютантов вследствие её нахождения как раз в зоне загрязнения НП (0–10 см верхнего почвенного покрова). Подобные выводы были также сделаны исследователями в работах [7, 16, 21].

С целью оценки влияния на токсичность почв концентрации НП, ТМ и показателя pH среды был проведён корреляционный анализ. Результаты исследования представлены в таблице 5.

Наблюдается высокая положительная корреляционная связь между интегральным показателем токсичности и содержанием НП в почве, такая же зависимость выявлена и в случае с загрязнением цинком. Наибольшее угнетающее воздействие микроорганизмы, судя по всему, испытывают именно со стороны этих поллютантов, что подтверждается исследованием [22], в ходе которого была выявлена прямая корреляция между токсичностью почвы и содержанием в ней цинка, свинца и НП.

Известно [23], что цинк относится к ТМ повышенной токсичности, которая проявляется при его высоких концентрациях в почве.

Таблица 5 / Table 5

Коэффициент корреляции между токсичностью почвы и содержанием в ней нефтепродуктов и тяжёлых металлов, а также значением pH ( $p < 0,05$ )  
Correlation coefficient between soil toxicity and content of oil products and heavy metals, and pH ( $p < 0.05$ )

Интегральный показатель токсичности Integral toxicity indicator	Доза НП Oil products dose	pH	Co	Ni	Cu	Zn	Pb
<i>T</i>	0,83	-0,61	-0,31	0,03	-0,29	0,88	-0,12

Согласно данным таблицы 3, содержание некоторых металлов (Co, Ni, Cu, Zn) в контрольной почве превышают ПДК в 1,2–2,4 раза, однако биотестирование показало допустимый уровень токсичности для данных проб ( $T < 20$ ). Из этого следует, что НП в загрязнённых почвах являются наиболее приоритетными токсикантами для тест-объекта. Сходные результаты получены в исследовании [10], где показано, что токсический эффект для биосенсора начинает проявляться при концентрации НП в почве 3 г/кг (допустимый уровень токсичности). В работе [24] указывается на острое токсическое действие водных вытяжек нефтезагрязнённых почв при дозе 100 г/кг, дальнейшее увеличение концентрации ведёт к ещё большему ингибированию интенсивности процессов жизнедеятельности микроорганизмов.

Кроме того, выявлена высокая отрицательная корреляция между показателем pH и токсичностью, что свидетельствует о негативном влиянии кислой среды почвенной вытяжки на жизнедеятельность тест-объекта. В методике № 01.019-07 указано, что отклонение pH от диапазона 6,5–8,0 может приводить к увеличению токсичности среды для биолюминесцентных бактерий, входящих в состав препарата. Из этого следует, что кислая среда почвы также может вносить вклад в суммарный показатель интегральной токсичности, измеряемый прибором.

### Заключение

Таким образом, отработанное масло, внесённое в почву, оказывает негативное влияние, как на физико-химические, так и на биологические характеристики почвы. Трёхлетний мониторинг показывает, что загрязнение почв отработанными НП приводит к незначительному увеличению кислотности почв (при высоких дозах), увеличению концентрации цинка; соединения меди являются весьма подвижными, что может негативно сказываться

на ризосфере. Оценка жизнедеятельности биосенсора (*E. coli*), проведённая в ходе исследований, позволяет сделать вывод о негативном влиянии загрязнения на эти микроорганизмы. Несмотря на повышенное содержание цинка, наибольшую опасность для бактерий представляют именно НП, которые в случае с дозой 30 г/кг почвы с каждым последующим годом наблюдений увеличивают своё токсическое воздействие на тест-объект. Это обусловлено достаточно высоким содержанием в отработанном масле ароматических углеводородов (6,87% от общей массы), которые являются наиболее токсичной фракцией, входящей в состав поллютанта.

### Литература

1. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2021 год / Под ред. Г.М. Черногаевой. М.: Росгидромет, 2022. 220 с.
2. Цветкова И.В., Лихоманенко В.А. Особенности утилизации отработанных моторных масел неселективного сбора // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 27–29.
3. Дегтярева И.А., Мотина Т.Ю., Бабынин Э.В., Ежкова А.М., Давлетшина А.Я. Эколого-токсикологическая оценка процесса биоремедиации нефтезагрязнённой почвы // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 196–202.
4. Borah G., Deka H. Crude oil associated heavy metals (HMs) contamination in agricultural land: understanding risk factors and changes in soil biological properties // Chemosphere. 2023. V. 310. Article No. 136890. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136890
5. Pengxue G., Anzhou M., Xiaoxia W., Xianke C., Jun Y., Futang H., Xuliang Z., Maoyong S., Guoqiang Z. Interaction and spatio-taxonomic patterns of the soil microbiome around oil production wells impacted by petroleum hydrocarbons // Environmental Pollution. 2022. V. 307. Article. No. 119531. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119531
6. Абазов З.А., Кетенчиев Х.А., Алтуев А.М., Львов В.Д. Оценка влияния нефтяного загрязнения на почвенно-растительный покров на территории участка эксплуатации магистрального нефтепровода «Малгобек-

Тихорецк» // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51. № 1. С. 202–209.

7. Заушинцева А.В., Заушинцен А.С., Мальцева А.Т., Свиркова С.В., Тарасова И.В., Барышева О.В. Реакция растительного покрова на загрязнение почвы нефтепродуктами // Вестник Кемеровского государственного университета. 2014. Т. 2. № 1 (57). С. 7–12.

8. Płaza G., Nałecz-Jawecki G., Ulfig K., Brigmon R.L. The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation // Chemosphere. 2005. V. 59. No. 2. P. 289–296.

9. Леднев А.В., Скворцова И.А. Влияние нефтяного загрязнения на степень токсичности торфяных почв // Вестник Казанского ГАУ. 2015. № 4 (38). С. 70–75.

10. Олькова А.С., Зимонина Н.М., Лялина Е.И., Бобрецова В.Р. Диагностика локального загрязнения урбаноёмов в районах автозаправочных станций // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 56–62.

11. Куликова О.А., Терехова В.А., Мазлова Е.А., Нишкевич Ю.А., Кыдралиева К.А. Экоотоксикологические характеристики нефтезагрязнённых грунтов (шламов) после их реагентной обработки // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 120–126.

12. Прусаченко А.В., Проценко А.А., Миронов С.Ю., Гриненко И.А., Клеева Н.А., Галяс А.В. Фитотестирование в оценке токсичности городских почв // Экология урбанизированных территорий. 2010. № 2. С. 105–109.

13. Хазиев А.А., Лаушкин А.В., Постолиит А.В., Васильева Л.С., Борисов Б.С. Экспресс-анализ моторных масел на основе инфракрасной спектроскопии с разложением в ряд Фурье // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 2. С. 116–125.

14. Деркач С.Р., Берестова Г.И., Новиков В.Ю., Колотова Д.С., Бричка К.М., Simonsen G. Химический состав нефти шельфа Печорского моря // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20. № 1/1. С. 38–47.

15. Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как геохимические маркеры нефтяного загрязнения окружающей среды // Экспозиция Нефть Газ. 2014. № 4 (36). С. 92–96.

16. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Ковач Р.Г., Кошовский Т.С., Хлынина Н.И. Углеводородное состояние почв при разновозрастном нефтяном загрязнении // Почвоведение. 2016. № 5. С. 574–583.

17. Козлов А.В., Бодякшина М.А., Калинин З.С., Ронжин С.С., Захарова А.А. Оценка уровня фоновой аккумуляции приоритетных экотоксикантов в почвенном покрове промышленных территорий и почвенно-техногенной смеси на объекте размещения отходов в Нижегородской области // Успехи современного естествознания. 2021. № 12. С. 132–137.

18. Сазонова О.В., Сучков В.В., Рязанова Т.К., Судакова Т.В., Торопова Н.М., Вистяк Л.Н., Тушикова Д.С. Исследование закономерностей химического загрязнения почвенного покрова в зоне деятельности

нефтехимического предприятия // Здоровье населения и среда обитания – ЗНИСО. 2017. № 6 (291). С. 18–21.

19. Мерзлякова А.А., Околелова А.А., Заикина В.Н., Пасикова А.В. Изменение свойств нефтезагрязнённых почв // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. № 2. С. 173–180.

20. Adesodun J.K., Mbagwu J.S.C. Distribution of heavy metals and hydrocarbon contents in an alfisol contaminated with waste-lubricating oil amended with organic wastes // Bioresource Technology. 2008. V. 99. No. 8. P. 3195–3204. doi: 10.1016/j.biortech.2007.05.048

21. Trifonova T.A., Alkhotova E.Y. Phytomass change in natural phytocenosis as an indicator of technogenic pollution of soils with heavy metals // International Journal of Phytoremediation. 2016. V. 18. No. 12. P. 1209–1220.

22. Khudur L.S., Gleeson D.B., Ryan M.H., Shahsavari E., Haleyr N., Nuggeoda D., Ball A.S. Implications of co-contamination with aged heavy metals and total petroleum hydrocarbons on natural attenuation and ecotoxicity in Australian soils // Environmental Pollution. 2018. V. 243. Part A. P. 94–102.

23. Водяницкий Ю.Н. Формы цинка в загрязнённых почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2010. № 3. С. 293–302.

24. Бузмаков С.А., Егорова Д.О., Гатина Е.Л. Доза-эффект нефтезагрязнения почв на биотический компонент экосистем // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 2. С. 217–229.

## References

1. Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2021 / Ed. G.M. Chernogaeva. Moskva: Rosgidromet, 2022. 220 p. (in Russian).

2. Tsvetkova I.V., Likhomanenko V.A. Features of the disposal of used motor oils of non-selective collection // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2014. No. 1. P. 27–29 (in Russian).

3. Degtyareva I.A., Motina T.Yu., Babynin E.V., Ezhkova A.M., Davletshina A.Ya. Ecological and toxicological assessment of bioremediation of oil-contaminated soil // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 3. P. 196–202 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-196-202

4. Borah G., Deka H. Crude oil associated heavy metals (HMs) contamination in agricultural land: understanding risk factors and changes in soil biological properties // Chemosphere. 2023. V. 310. Article No. 136890. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.136890

5. Pengxue G., Anzhou M., Xiaoxia W., Xianke C., Jun Y., Futang H., Xuliang Z., Maoyong S., Guoqiang Z. Interaction and spatio-taxonomic patterns of the soil microbiome around oil production wells impacted by petroleum hydrocarbons // Environmental Pollution. 2022. V. 307. Article No. 119531. doi: 10.1016/j.envpol.2022.119531

6. Abazov Z.A., Ketenchiev Kh.A., Altuev A.M., L'vov V.D. Influence of oil pollution on soil and vegetation cover in the operation territory of the main oil pipeline "Malgobek-Tikhoretsk" // *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. V. 51. No. 1. P. 202–209 (in Russian).
7. Zaushincena A.V., Zaushincen A.S., Mal'ceva A.T., Svirkova S.V., Tarasova I.V., Barysheva O.V. Vegetation degradation due to soil pollution with oil // *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2014. V. 2. No. 1 (57). P. 7–12 (in Russian).
8. Płaza G., Nałęcz-Jawecki G., Ulfig K., Brigmon R.L. The application of bioassays as indicators of petroleum-contaminated soil remediation // *Chemosphere*. 2005. V. 59. No. 2. P. 289–296. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.11.049
9. Lednev A.V., Skvorcova I.A. Impact of oil pollution on toxicity level of peat soils // *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2015. No. 4 (38). P. 70–75 (in Russian). doi: 10.12737/17621
10. Ol'kova A.S., Zimonina N.M., Lyalina E.I., Bobrecova V.R. Diagnostics of local pollution of urbanozem in the areas of petrol stations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 1. P. 56–62 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-1-056-062
11. Kulikova O.A., Terekhova V.A., Mazlova E.A., Nishkevich Yu.A., Kydraliev K.A. Ecotoxicological characteristics of oil-contaminated soils (sludges) after their reagent treatment // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 120–126 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-120-126
12. Prusachenko A.V., Procenko A.A., Mironov S.YU., Grinenko I.A., Kleeva N.A., Galyas A.V. Phytoassay of the urban soils toxicity // *Ekologiya urbanizirovannyh territoriy*. 2010. No. 2. P. 105–109 (in Russian).
13. Haziev A.A., Laushkin A.V., Postolit A.V., Vasil'eva L.S., Borisov B.S. Quick analysis of engine oils based on fast Fourier transformation spectroscopy // *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2017. No. 2. P. 116–125 (in Russian). doi: 10.15593/24111678/2017.02.10
14. Derkach S.R., Berestova G.I., Novikov V.YU., Kolotova D.S., Brichka K.M., Simonsen G. Chemical composition of Pechora Sea crude oil // *Vestnik MGTU*. 2017. V. 20. No. 1/1. P. 38–47 (in Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-38-47
15. Haustov A.P., Redina M.M. Polycyclic aromatic hydrocarbons as geochemical markers of oil pollution of the environment // *Ekspozitsiya Neft' Gaz*. 2014. No. 4 (36). P. 92–96 (in Russian).
16. Gennadiev A.N., Pikovskiy YU.I., Kovach R.G., Koshovskij T.S., Hlynina N.I. Hydrocarbon status of soils under different ages of oil contamination // *Pochvovedenie*. 2016. No. 5. P. 574–583 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X16050051
17. Kozlov A.V., Bodyakshina M.A., Kalinicheva Z.S., Ronzhin S.S., Zakharova A.A. Assessment of background accumulation level priority ecotoxicants in soil cover industrial areas and soil-technogenic mixture at waste disposal facility in the nizhny novgorod region // *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2021. No. 12. P. 132–137 (in Russian).
18. Sazonova O.V., Suchkov V.V., Ryazanova T.K., Sudakova T.V., Toropova N.M., Vistyak L.N., Tupikova D.S. The study of features of soil contamination in the zone of activity of the oil refinery // *Zdorove naseleniya i sreda obitaniya – ZNISO*. 2017. No. 6 (291). P. 18–21 (in Russian).
19. Merzlyakova A.A., Okolelova A.A., Zaikina V.N., Pasikova A.V. Changing the properties of oil-contaminated soils // *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya*. 2017. V. 7. No. 2. P. 173–180 (in Russian). doi: 10.21285/2227-2925-2017-7-2-173-180
20. Adesodun J.K., Mbagwu J.S.C. Distribution of heavy metals and hydrocarbon contents in an alfisol contaminated with waste-lubricating oil amended with organic wastes // *Bioresource Technology*. 2008. V. 99. No. 8. P. 3195–3204. doi: 10.1016/j.biortech.2007.05.048
21. Trifonova T.A., Alkhutova E.Y. Phytomass change in natural phytocenosis as an indicator of technogenic pollution of soils with heavy metals // *International Journal of Phytoremediation*. 2016. V. 18. No. 12. P. 1209–1220. doi: 10.1080/15226514.2016.1193469
22. Khudur L.S., Gleeson D.B., Ryan M.H., Shahsavari E., Haleyr N., Nugegoda D., Ball A.S. Implications of co-contamination with aged heavy metals and total petroleum hydrocarbons on natural attenuation and ecotoxicity in Australian soils // *Environmental Pollution*. 2018. V. 243. Part A. P. 94–102. doi: 10.1016/j.envpol.2018.08.040
23. Vodyanickiy Yu.N. Zinc forms in contaminated soils (literature review) // *Pochvovedenie*. 2010. No. 3. P. 293–302 (in Russian).
24. Buzmakov S.A., Egorova D.O., Gatina E.L. The dose-effect of oil pollution of soils on the biotic component of ecosystems // *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2017. V. 25. No. 2. P. 217–229 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2017-25-2-217-229

## Рациональная утилизация серосодержащих отходов

© 2023. Н. В. Сырчина<sup>1</sup>, к. х. н., с. н. с.,  
С. Г. Скугорева<sup>2</sup>, к. б. н., 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: nvms1956@mail.ru

Хранение извлекаемой из углеводородного сырья серы ( $S^0$ ) на открытых площадках (серных картах) приводит к загрязнению серы грунтом. Поскольку серо-грунтовая смесь (СГС) не пригодна для дальнейшей химической переработки, а разделение её на отдельные компоненты экономически не рентабельно, её отправляют на специализированные полигоны в качестве отхода IV класса опасности под названием «грунт, загрязнённый серой при ремонте ямы хранения серы, серных карт, серопроводов». Одним из вариантов использования соответствующего отхода без разделения его на отдельные компоненты может стать производство мелиорантов для щелочных засоленных почв. Выполненные исследования показывают, что внесение тонкоизмельчённой СГС в щелочную засоленную почву приводит к уменьшению содержания карбонатов и гидрокарбонатов, снижению pH, увеличению удельной электропроводности, повышению подвижности фосфора и калия, активному вытеснению катионов  $Na^+$  из почвенного поглощающего комплекса (ППК) в раствор. Переход ионов из ППК в раствор значительно облегчает возможность удаления избытка солей из почвы методом промывания. Основной эффект от применения СГС проявляется в течение первых трёх недель после внесения мелиоранта и зависит от количества внесённой в почву серы. Мелиорирующее действие СГС обусловлено микробиологическими процессами окисления  $S^0$  до серосодержащих кислот. Внедрение технологии переработки СГС в мелиоранты позволит минимизировать количество складированных на полигонах серосодержащих отходов и вывести на рынок бюджетный натуральный и эффективный агрохимикат для восстановления плодородия щелочных засоленных почв. Полученные результаты могут быть использованы в качестве экспериментальной основы для разработки новых направлений переработки СГС в товарные продукты.

**Ключевые слова:** отходы производства, сера, серозагрязнённый грунт, рациональная утилизация, засоленные почвы, мелиоранты.

## Rational disposal of sulfur-containing waste

© 2023. N. V. Syrchina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760  
S. G. Skugoreva<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-5902-5187  
T. I. Kutyavina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7957-0636

<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: nvms1956@mail.ru

Storage of sulfur extracted from hydrocarbon raw materials in open areas (sulfur pads) leads to soil contamination of sulfur. The sulfur-soil mixture is not suitable for further chemical processing, and its separation into individual components is not economically viable. In this regard, it is sent to specialized landfills as hazard class IV waste called "soil contaminated with sulfur during the repair of sulfur storage pits, sulfur pads, sulfur pipelines". The production of ameliorants for alkaline saline soils is one option to utilize this waste without separating it into components. The application of a finely ground sulfur-soil mixture into alkaline saline soil decreases pH and the carbonates and bicarbonates content, increases specific electrical conductivity and the phosphorus and potassium mobility, as well as leads to the active displacement of  $Na^+$  cations from the soil absorption complex into the solution. The ions transition from the soil absorption complex into solution considerably facilitates the removal of excess salts from the soil by washing. The main effect of sulfur-soil mixture application is during the first three weeks after applying the ameliorant. It depends on the amount of sulfur applied to the soil. The introduction of technology for processing sulfur-soil mixtures into ameliorants

will minimize the amount of sulfur-containing waste stored in landfills and bring to the market a budget-friendly, natural and effective agrochemical to restore the fertility of alkaline saline soils. The results obtained can be used as an experimental basis for the development of new processing of sulfur-soil mixtures into marketable products.

**Keywords:** industrial waste, sulfur, soil contaminated with sulfur, rational disposal, saline soils, ameliorants.

Сера входит в число важнейших ресурсов современной химической промышленности, основным направлением использования которого является производство серной кислоты. До 80% поступающей на мировой рынок серы ( $S^0$ ) представляет собой побочный продукт переработки углеводородного сырья. Массовая доля соответствующего элемента в нефти и природном газе обычно составляет 1–3% [1]. Соединения серы оказывают крайне негативное влияние на технологические свойства и экологические характеристики добываемых углеводородов, поэтому в процессе переработки серосодержащие примеси из соответствующего сырья удаляют. Рост объёмов добычи углеводородов и ужесточение экологических норм и требований к содержанию в нём сернистых соединений неизбежно приводят к увеличению объёмов извлекаемой  $S^0$  и формированию некоторого избытка этого продукта на рынке [2]. Образующиеся на предприятиях запасы  $S^0$  часто хранятся на открытых площадках (серных картах) [3, 4], что приводит к смешиванию серы и грунта. Выделение  $S^0$  из соответствующей смеси в условиях низких цен на соответствующий продукт нерентабельно, поэтому серо-грунтовые смеси (СГС) попадают в категорию отходов. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов, утверждённому приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242 (с изменениями от 29.03.2021 № 149), загрязнённой серой грунту присвоен код 31211395204 и название – «грунт, загрязнённый серой при ремонте ямы хранения серы, серных карт, серопроводов». Класс опасности: IV – малоопасные вещества. Как правило, соответствующий отход вывозится из мест образования и складировается на специализированных полигонах, что приводит к дополнительным материальным затратам и наносит существенный вред окружающей среде [5]. Одним из возможных вариантов практического применения СГС может стать её переработка в мелиоранты (подкисляющие агенты) для щелочных засоленных почв. Целесообразность включения  $S^0$  в состав удобрений и мелиорантов обоснована во многих публикациях [6–8].

Вносимая в почву  $S^0$  подвергается микробиологическому окислению, конечным про-

дуктом которого является серная кислота. В окислении  $S^0$  могут принимать участие различные группы микроорганизмов: облигатные хемолитотрофы, миксотрофы, хемолитотрофные гетеротрофы и некоторые другие [9–13]. Благодаря активности сероокисляющей микробиоты, продуцирующей  $H_2SO_4$ , снижается pH щелочных почв, повышается биодоступность элементов минерального питания, улучшаются физические свойства почвы. Основными факторами, от которых зависит скорость окисления  $S^0$ , являются температура, влажность, аэрация, pH, микробное разнообразие и степень дисперсности соответствующего мелиоранта [14–16].

Цель настоящей работы состояла в оценке возможности и эффективности использования серо-грунтовой смеси в качестве подкисляющего агента для щелочных засоленных почв.

### Материалы и методы исследования

Для проведения исследований были использованы образцы СГС, отобранные с поверхности серных карт. Серо-грунтовая смесь представляла собой влажный неоднородный по составу комковатый материал, состоящий из смеси  $S^0$  и каменистого диабазового щебня. Перед проведением исследований СГС высушивали в сушильном шкафу при температуре  $55 \pm 5$  °C до постоянной массы, измельчали и просеивали через сито с размером ячеек  $1 \times 1$  мм. Готовый продукт представлял собой тонкоизмельчённую серу с частицами диабазового щебня менее 1 мм. Массовая доля  $S^0$  –  $80 \pm 5\%$ . Более тщательная очистка  $S^0$  от грунта не имеет практического смысла. Мелкие частицы грунта снижают пожаро- и взрывоопасность диспергированной серы; являются носителями уникальной сероокисляющей микробиоты, сформировавшейся в процессе хранения СГС; являются источниками ценных микроэлементов.

Исследования проводили на примере щелочной засоленной почвы: pH фильтрованной водной вытяжки (соотношение почва : вода – 1 : 5):  $8,7 \pm 0,4$ ; удельная электропроводность (УЭП):  $259 \pm 12$  мкСм/см; содержание карбонат-ионов: 0,1 мг-экв./100 г; концентрация гидрокарбонат-ионов: 0,75 мг-экв./100 г.

В почву, согласно вариантам эксперимента, вносили добавки подготовленной СГС, перемешивали, загружали в пластиковые контейнеры, увлажняли дистиллированной водой до 60% от полной влагоёмкости и оставляли в помещении в условиях естественного освещения. Масса почвы в каждом контейнере составляла 1 кг. Экспериментальные исследования проводили в летний период. Температура в помещении:  $+25 \pm 2$  °С. Воду в контейнеры добавляли только после полного высыхания почвы. Отбор проб для химического анализа проводили методом конверта из поверхностного слоя почвы (0–3 см) до внесения и на 17, 20 и 28 сут с момента внесения СГС.

Варианты эксперимента: 1) почва без добавок (контроль); 2) почва + СГС 0,75 г/кг; 3) почва + СГС 1,5 г/кг; 4) почва + СГС 3,0 г/кг; 5) почва + СГС 4,5 г/кг.

О влиянии СГС на свойства щелочной засоленной почвы судили по таким показателям, как УЭП и рН фильтрованных и нефильтрованных вытяжек, а также по содержанию в водных вытяжках ионов  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ , соединений фосфора.

Приготовление водных вытяжек и измерение рН и УЭП контрольных и экспериментальных проб почвы проводили согласно ГОСТ 26423-85. Концентрацию ионов натрия, калия, магния, кальция, нитрат-, сульфат- и

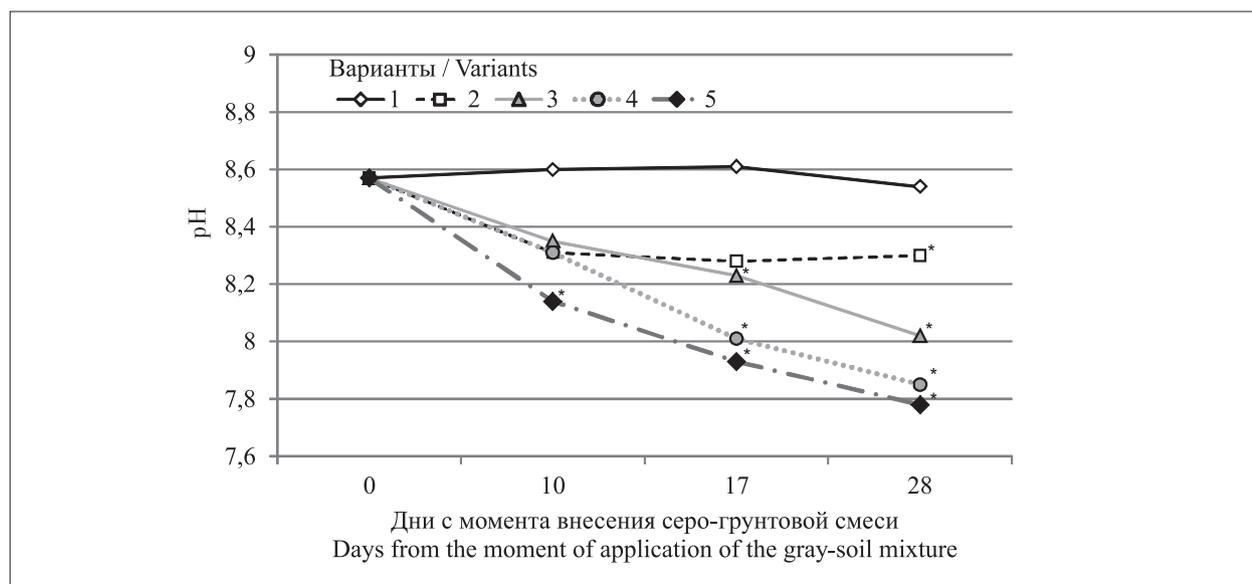
хлорид-ионов измеряли на ионном хроматографе «Стайер» (НПК Аквилон, Россия) по ФР.1.31.2005.01724 и ФР.1.31.2008.01738. Пробы для хроматографического анализа предварительно фильтровали через фильтр «синяя лента», разбавляли деионизированной водой в 20–25 раз. Соединения подвижного фосфора определяли по методу Мачигина (ГОСТ 26205-91). Определение карбонатов и гидрокарбонатов в водной вытяжке проводили по ГОСТ Р 59540-2021.

### Результаты и обсуждение

В результате исследований установлено, что добавка СГС приводила к существенному изменению свойств щелочной засоленной почвы во всех вариантах эксперимента. Содержание гидрокарбонатов снижалось до 0,20–0,25 мг-экв./100 г абсолютно сухой почвы, а концентрация карбонатов оказалось ниже предела обнаружения.

На рисунках 1 и 2 приведены диаграммы, характеризующие динамику изменения рН и УЭП фильтрованных водных вытяжек разных вариантов эксперимента.

Согласно полученным результатам, добавки СГС привели к снижению рН и увеличению УЭП водных вытяжек во всех вариантах. Наиболее резкое повышение УЭП



**Рис. 1.** Динамика изменения водородного показателя (рН) водной вытяжки из почвы.

Здесь и далее варианты эксперимента: 1 – почва без добавок (контроль); 2 – почва + серо-грунтовая смесь (СГС) 0,75 г/кг; 3 – почва + СГС 1,5 г/кг; 4 – почва + СГС 3,0 г/кг; 5 – почва + СГС 4,5 г/кг. Звёздочкой выделены статистически значимые различия между контролем и опытными вариантами при  $P > 0,95$

**Fig. 1.** The pH dynamics of the soil's aqueous extract. Here and below, experimental options:

1 – soil without additives (control); 2 – soil + sulfur-soil mixture (SSM) 0.75 g/kg; 3 – soil + SSM 1.5 g/kg; 4 – soil + SSM 3.0 g/kg; 5 – soil + SSM 4.5 g/kg. An asterisk indicates statistically significant differences between control and experimental variants at  $P > 0.95$

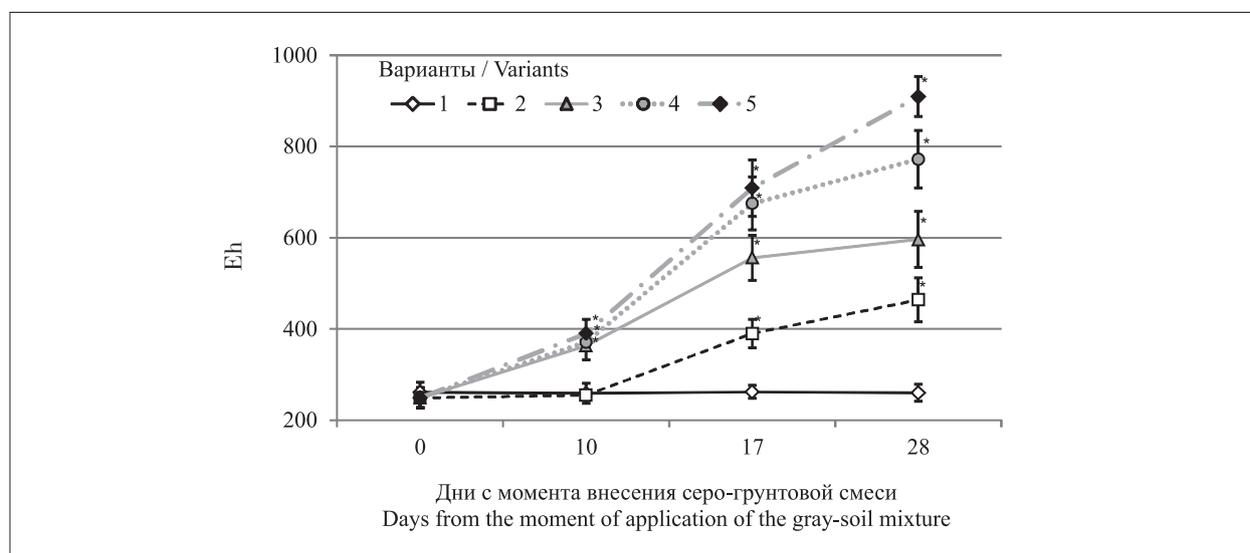


Рис. 2. Динамика изменения удельной электропроводности фильтрованной вытяжки из почвы  
 Fig. 2. The specific electrical conductivity dynamics of the soil's aqueous extract (filtered)

Таблица 1 / Table 1

Содержание анионов (мг/дм<sup>3</sup>) в водной вытяжке из почвы 1 : 5 на 28 сут с момента внесения СГС  
 The anion content (mg/dm<sup>3</sup>) in the soil's aqueous extract 1 : 5 on the 28th day from the SSM application

Варианты / Variants	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
1	51±6	4,1±0,5	35,6±1,3	0,21±0,04
2	106±13*	21,8±2,3*	196±19*	0,31±0,05*
3	231±22*	12,7±1,6*	273±25*	0,32±0,05*
4	126±10*	8,8±1,0*	266±27*	0,43±0,06*
5	149±14*	0,56±0,09*	432±39*	0,55±0,08*

наблюдалось на третьей неделе после внесения СГС, а снижение pH – в течение первых двух недель. Чем больше масса добавленной СГС, тем более выраженными были соответствующие эффекты. Через 3 недели после внесения добавок скорость нарастания УЭП снизилась. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, опубликованными другими исследователями. Так, в работе [17] было выявлено, что окисление S<sup>0</sup> протекает в две стадии: с высокой скоростью в течение первых 28 сут и медленно в дальнейшем. Наибольшая скорость окисления до 12,8 мкгS/(см<sup>2</sup> · сут) отмечалась в течение первых двух недель при температуре 30 °С.

В таблицах 1 и 2 приведены данные об изменении ионного состава водных вытяжек из почвы через 28 сут после внесения добавок СГС.

Согласно данным таблицы 1, содержание хлоридов в водной вытяжке увеличилось в 2,1–2,5 раза, содержание сульфатов – в 5,5–14 раз, содержание фосфора – в 1,5–2,5 раза

по сравнению с контролем. Повышение концентрации сульфатов и фосфатов в водной вытяжке положительно коррелировало с массой добавленной СГС. Коэффициент корреляции между массой добавленной СГС и содержанием сульфатов в водной вытяжке равен 0,95; между массой добавленной СГС и содержанием фосфатов – 0,98. Корреляционные связи между содержанием в вытяжке хлоридов и количеством внесённой СГС выявить не удалось.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что внесение S<sup>0</sup> в щелочную засоленную почву является эффективным агрохимическим приёмом, позволяющим повысить подвижность и биодоступность фосфора. Основной причиной перехода фосфора из твёрдой фазы в раствор является оптимизация (снижение) pH.

Интересная зависимость была выявлена между массой СГС и содержанием в водной вытяжке нитратов: самая низкая добавка (0,75 г/кг) привела к самому значительному накоплению нитратов. Увеличение массы до-

бавки сопровождалось снижением содержания нитратов, и при максимальной добавке содержание нитратов в водной вытяжке стало ниже, чем в контроле. Известно, что накоплению связанных форм азота способствуют почвенные азотофиксирующие микроорганизмы [18]. Внесение в почву небольшого количества СГС оказывает положительное влияние на активность почвенной микробиоты за счёт повышения биодоступности элементов минерального питания (табл. 1, 2). Чрезмерное повышение концентрации растворимых солей в вариантах с высокими нормами СГС может оказать угнетающее воздействие на их жизнедеятельность, в результате содержание нитратов в почве снижается. Снижению содержания нитратов может способствовать и активное развитие сероокисляющей микробиоты, включающей связанные формы азота в свой метаболизм.

В таблице 2 приведены данные, характеризующие влияние СГС на содержание катионов в водной вытяжке из почвы.

Согласно приведённым в таблице 2 данным, внесение в почву СГС приводит к существенному изменению катионного состава водной вытяжки: содержание  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  увеличивается примерно в 1,8–2,5 раза, содержание  $\text{Mg}^{2+}$  – в 3,5–8,0 раз;  $\text{Ca}^{2+}$  – в 2,8–6,8 раз по сравнению с контролем. Вытеснению соответствующих катионов в почвенный раствор способствуют протоны

$\text{H}^+$ , образующиеся при окислении  $\text{S}^0$  до серосодержащих кислот.

Содержание большинства катионов в почвенном растворе чётко коррелирует с рН и УЭП (табл. 3), при этом коэффициенты корреляции для ионов  $\text{K}^+$  несколько ниже, чем для других катионов. Полученные результаты можно объяснить тем, что основная часть почвенного калия довольно прочно закрепляется в кристаллической структуре полевых шпатов. Для перевода соответствующих форм  $\text{K}^+$  в раствор требуются весьма жёсткие условия [19].

Переход катионов и анионов из почвенного поглощающего комплекса в раствор в результате снижения рН значительно облегчает процесс удаления избытка солей из засоленной почвы методом промывания, что имеет большое практическое значение для восстановления их плодородия.

### Заключение

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что СГС является перспективным и ценным агрохимическим сырьём, пригодным для переработки в мелиоранты для ремедиации щелочных засоленных почв. Внесение тонкомолотой СГС в щелочные почвы способствует снижению щёлочности, увеличению удельной электропроводности почвенного раствора, активному вытеснению катионов  $\text{Na}^+$  из почвенного поглощающего

Таблица 2 / Table 2

Концентрация катионов ( $\text{мг/дм}^3$ ) в водной вытяжке из почвы 1 : 5 на 28 сут с момента внесения СГС  
The cation content ( $\text{mg/dm}^3$ ) in the soil's aqueous extract 1 : 5 on the 28th day from the SSM application

Варианты Variants	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
1	72±8	6,4±0,7	8,2±0,9	30±3*
2	114±10*	12,1±1,3*	26,4±1,9*	81±9*
3	155±16*	12,7±1,5*	38±5*	115±12*
4	177±20*	13,1±1,1*	44±5*	134±14*
5	171±19*	16,5±1,8*	56±7*	167±21*

Таблица 3 / Table 3

Корреляционные зависимости между значениями содержания катионов и удельной электропроводностью и рН / Correlation between cation content and specific electrical conductivity and рН

Содержание катионов в водной вытяжке Cations' content in aqueous extract	Удельная электропроводность Specific electrical conductivity		Водородный показатель (рН) pH value	
	суспензия suspension	фильтрат filtrate	суспензия suspension	фильтрат filtrate
$\text{Na}^+$	0,98	0,98	-0,92	-0,86
$\text{K}^+$	0,64	0,61	-0,76	-0,85
$\text{Mg}^{2+}$	0,86	0,83	-0,90	-0,94
$\text{Ca}^{2+}$	0,84	0,81	-0,88	-0,93

комплекса в раствор, повышению подвижности и биодоступности фосфора и калия.

Серо-грунтовая смесь может найти применение не только в качестве мелиоранта, но и в качестве серного удобрения пролонгированного действия для щелочных почв. Внесение соответствующего удобрения способствует повышению содержания в почве биодоступных форм серы и улучшению азотного, фосфорного и калийного питания растений.

Производство мелиорантов на основе СГС позволяет минимизировать количество складированных на полигонах серосодержащих отходов и вывести на рынок новую линейку натуральных бюджетных мелиорантов и удобрений для щелочных засоленных почв, что имеет большое экономическое и природоохранное значение.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве экспериментальной основы для разработки новых направлений переработки СГС в товарные продукты: мелиоранты для восстановления плодородия засоленных почв, а также серосодержащие минеральные, органо-минеральные и биоминеральные удобрения пролонгированного действия.

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

### References

1. Wagenfeld J.G., Al-Ali K., Almheiri S., Slavens A.F., Calvet N. Sustainable applications utilizing sulfur, a by-product from oil and gas industry: A state-of-the-art review // *Waste Management*. 2019. V. 95. P. 78–89. doi: 10.1016/j.wasman.2019.06.002
2. Ivanov A.V., Smirnov Y.D., Lisay V.V., Borowski G. Issues of the impact of granulated sulfur transportation on the environmental components // *Journal of Ecological Engineering*. 2023. V. 24. No. 6. P. 86–97. doi: 10.12911/22998993/162558
3. Esenamanova M.S., Sarbasova A.D. Impact of open sulfur storage on the environment and public health [Internet resource] [http://www.rusnauka.com/11\\_NPE\\_2012/Ecologia/1\\_108123.doc.htm](http://www.rusnauka.com/11_NPE_2012/Ecologia/1_108123.doc.htm) (Accessed: 18.09.2023) (in Russian).
4. Pishchulov S.A. Shore as a store of elemental sulfur // *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*. 2013. No. 4. P. 202–209 (in Russian).
5. Shagieva D.R., Khramov Yu.V. Assessment of the environmental impact of sulfur storage facilities // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. V. 18. No. 9. P. 269–271 (in Russian).
6. Elkhamad E. The effectiveness of gypsum and sulfur as ameliorants in solonetz soils // *Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2008. No. 3. P. 139–141 (in Russian).
7. Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Natural sulfur fertilizer with activated peat and glauconitic efel // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-134-141
8. Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyreva N.N., Kantor G.Ya. Optimization of the composition of fertilizers based on ground phosphorites // *Butlerovskie soobshcheniya*. 2019. V. 60. No. 12. P. 133–139 (in Russian).
9. Czaban J.A.N.U.S.Z., Kobus J.M.Z.E.F. Oxidation of elemental sulfur by bacteria and fungi in soil // *Acta Microbiologica Polonica*. 2000. V. 49. No. 2. P. 135–147.
10. Kuenen J.G. Colourless sulfur bacteria and their role in the sulfur cycle // *Plant and Soil*. 1975. V. 43. P. 49–76.
11. Vidyalakshmi R., Paranthaman R., Bhagyaraj R. Sulphur oxidizing bacteria and pulse nutrition – a review // *World Journal of Agricultural Sciences*. 2009. V. 5. No. 3. P. 270–278.
12. Huber B., Herzog B., Drewes J.E., Koch K., Müller E. Characterization of sulfur oxidizing bacteria related to biogenic sulfuric acid corrosion in sludge digesters // *BMC Microbiology*. 2016. V. 16. Article No. 153. doi: 10.1186/s12866-016-0767-7
13. Wainwright M. Microbial sulphur oxidation in soil // *Science Progress*. 1978. V. 65. No. 260. P. 459–475.
14. Mudrak A.V. Intensity of microbiological processes of oxidation and dissolution apatite soil sod medium depending on the method of their joint use as fertilizers, without chemical processing // *Foundations of spiritual and molecular-genetic improvement of human health and environmental protection: collective monograph*. London: IASHE, 2016. P. 83–87 (in Russian).
15. Germida J.J., Janzen H.H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils // *Fertilizer research*. 1993. V. 35. P. 101–114. doi: 10.1007/BF00750224
16. Yang Z., Haneklaus S., Ram Singh B., Schnug E. Effect of repeated applications of elemental sulfur on microbial population, sulfate concentration, and pH in soils // *Communications in soil science and plant analysis*. 2007. V. 39. No. 1–2. P. 124–140. doi: 10.1080/00103620701759079
17. Zhi-Hui Y., Stöven K., Haneklaus S., Singh B.R., Schnug E. Elemental sulfur oxidation by *Thiobacillus* spp. and aerobic heterotrophic sulfur-oxidizing bacteria // *Pedosphere*. 2010. V. 20. No. 1. P. 71–79. doi: 10.1016/S1002-0160(09)60284-8
18. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. The effect of enrichment tailings of phosphorites as fertilizers on soil alga-cyanobacterial communities // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 174–180 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-174-180
19. Yakimenko V.N. Potassium forms in soil and methods of determination // *The Journal of Soils and Environment*. V. 1. No. 1. P. 25–31 (in Russian). doi: 10.31251/pos.v1i1.5

## Оценка применимости почвогрунтов, произведённых из твёрдых отходов для выращивания лекарственных растений

© 2023. Т. С. Дроганова<sup>1</sup>, ст. преподаватель,

Л. В. Поликарпова<sup>1</sup>, н. с., М. А. Севостьянов<sup>2</sup>, к. т. н.,  
руководитель центра, А. А. Мазуркевич<sup>1</sup>, магистрант,

<sup>1</sup>Государственный университет просвещения,

141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии,  
43050, Россия, г. Одинцово, р. п. Большие Вязёмы, ул. Институт, д. 5,

e-mail: ecolab@mgu.ru

Производство почвогрунтов – продуктов твёрдофазного ферментирования твёрдых бытовых отходов является одним из основных направлений переработки отходов мегаполисов, содержащих органические вещества, и является «зелёной» альтернативой их сжиганию или захоронению. В работе исследована возможность применения искусственных почвогрунтов – продуктов аэробного твёрдофазного ферментирования отходов – для выращивания лекарственных растений чабера горного (*Satureja montana* L.), базилика обыкновенного (*Ocimum basilikum* L.), алтея лекарственного (*Althaea officinalis* L.), душицы обыкновенной (*Origanum vulgare* L.). Выявлено, что оптимальная всхожесть растений проявляется на почвогрунтах «Klasmann Substrates Select» и «Grunt ECO Питательный» и сравнима с контрольной почвой полевого севооборота. Показано изменение биохимических параметров растений (активности ферментов и содержания хлорофилла), выращиваемых на почвогрунтах, в норме, при действии тяжёлых металлов и при пониженной температуре. Отмечено высокое содержание хлорофилла у всех исследованных растений, однако у чабера горного, выращенного на субстрате «Veltorf», выявлены деструктивные явления, выражающиеся в снижении содержания хлорофилла *a* с одновременным повышением содержания хлорофилла *b*. Активность ферментов каталазы и кислой фосфатазы у исследованных растений находится в пределах нормы. Действие неблагоприятных факторов – пониженной температуры и тяжёлых металлов приводит к повышению активности ферментов, что является признаком формирования адаптации. При оценке всхожести растений различных видов и их биохимических показателей установлено, что отечественный почвогрунт компании «Grunt ECO» оптимален для выращивания лекарственных растений и может быть использован для целей лекарственного растениеводства.

**Ключевые слова:** почвогрунт, компостирование, лекарственные растения, всхожесть, биохимические показатели, кислая фосфатаза, каталаза, хлорофилл.

## Assessment of the possibility of using solid waste compost for growing medicinal plants

© 2023. T. S. Droganova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-8917-7392<sup>2</sup> L. V. Polikarpova<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-5459-3054<sup>2</sup>

M. A. Sevostyanov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0003-2652-8711<sup>2</sup> A. A. Mazurkevich<sup>1</sup> ORCID: 0009-0003-3237-8454<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State University of Education,

24, Very Voloshinoy St., Mytishchi, Russia, 141014,

<sup>2</sup>All-Russian Research Institute of Phytopathology,

5, Institute St., Odintsovo, Bolshiye Vyazyomy, Russia, 143050,

e-mail: ecolab@mgu.ru

The production of artificial soils – products of solid-phase fermentation of municipal solid waste – is one of the main areas of processing waste from megacities containing organic substances and is a “green” alternative to their incineration or burial. The possibility of using products of solid-phase fermentation of waste for growing medicinal plants was studied using the examples of mountain savory (*Satureja montana* L.), common basil (*Ocimum basilikum* L.), marshmallow (*Althaea officinalis* L.), oregano (*Origanum vulgare* L.). It was revealed that the optimal germination of plants occurs on the artificial soils “Klasmann Substrates Select” and “Grunt ECO” and it is comparable to the control soil of field crop rotation. The changes in the biochemical parameters of plants (enzyme activity, chlorophyll content) grown on soils under normal conditions, under the influence of heavy metals and at low temperatures are shown. High chlorophyll content was noted in all studied plants, however, in mountain savory grown on the “Veltorf” substrate, destructive phenomena were

revealed, expressed in a decrease in the content of chlorophyll *a* with a simultaneous increase in the content of chlorophyll *b*. The activity of catalase and acid phosphatase enzymes in the studied plants is within normal limits. The effect of unfavorable factors – low temperature and heavy metals – leads to an increase in enzyme activity, which is a sign of the formation of adaptation. When assessing the germination of plants of various species and their biochemical parameters, it was found that the domestic soil of the Grunt ECO company is optimal for growing medicinal plants and can be used for medicinal plant growing purposes.

**Keywords:** artificial soils, composting, medicinal plants, germination, biochemical parameters, acid phosphatase, catalase, chlorophyll.

Производство почвогрунтов – продуктов твёрдофазного ферментирования твёрдых бытовых отходов является одним из основных направлений создания технологий замкнутого цикла с низким выбросом парниковых газов. Внедрение таких технологий определено в Указе Президента Российской Федерации от 4 ноября 2020 г. № 666 «О сокращении выбросов парниковых газов» и постановлении Правительства РФ «О Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года». Почвогрунты, полученные в результате переработки отходов, используют в различных целях, среди которых сельскохозяйственное производство, садово-парковое использование и ремедиационные мероприятия.

Производство почвогрунтов из пищевых отходов, отходов сельскохозяйственных и деревообрабатывающих производств, а также целлюлозно-бумажных отходов является «зелёной» альтернативой их сжиганию или захоронению [1]. Методы и приёмы получения почвогрунтов имеют общий характер и сводятся к нескольким основным процессам. Одним из самых простых, но не самых привлекательных с точки зрения потребительских свойств, является простое смешивание, дробление и просеивание компонентов почвосмесей. Более сложными и затратными являются биологические технологии, в которых органические отходы IV и V классов опасности предварительно подвергают биологической переработке и только после этого смешивают с неорганическими компонентами. Технологии, реализующиеся на предприятиях по переработке отходов, как правило, являются коммерческой тайной, но некоторые сведения о реализованных технологиях получения почвогрунтов раскрываются производителями на своих сайтах [2–4].

Существенными преимуществами почвогрунтов, полученных при аэробной микробиологической ферментации, являются стерильность (отсутствие семян растений и патогенной микробиоты), высокая концентрация питательных веществ. Такие свойства почвогрунтов определяются высокой темпе-

ратурой протекания микробиологического процесса в условиях аэрации. Поскольку процесс окислительной деградации органических веществ является экзотермическим, то после мезофильной стадии начинается термофильная стадия, характеризующаяся повышением температуры до 55–75 °С, при которой происходит изменение микробного сообщества с мезофильного на термофильное, патогенные бактерии и грибы подавляются. Масса перерабатываемого органического вещества практически не изменяется, а в некоторых режимах может даже увеличиваться в результате образования множественных С-О связей при расщеплении биополимерных соединений [5].

Состав и свойства почвогрунтов зависят от используемых для ферментирования компонентов, и поэтому должна проводиться оценка применимости производимых субстратов. Таким образом, целью настоящей работы стало исследование применимости почвогрунтов, полученных в результате твёрдофазного ферментирования, для лекарственного растениеводства.

### Объекты и методы исследования

Для оценки применимости почвогрунтов были выбраны лекарственные растения (ЛР), имеющие различные физиологические свойства: чабер горный (*Satureja montana* L.), базилик обыкновенный (*Ocimum basilicum* L.), алтей лекарственный (*Althaea officinalis* L.), душица обыкновенная (*Origanum vulgare* L.).

В качестве субстратов изучали: питательный почвогрунт «Grunt ECO», производство Россия; смесь торфяная «Veltoft», производство Россия; почвогрунт для выращивания рассады «Klasmann Substrates Select», производство Германия; контроль – нативная почва полевого севооборота (Рязанская область), координаты места отбора почвы 54,651296°, 39,543922°.

Состав субстратов охарактеризован в работе [6]. Исследуемые почвогрунты показали высокие значения потери при прокаливании (69–87%), характеризующие содержание

органического вещества, тогда как для нативной почвы полевого севооборота значение потери при прокаливании не превышает 10%. Изучаемые почвогрунты за исключением грунта «Klasmann Substrates Select», а также почва полевого севооборота характеризуются высокой обеспеченностью макроэлементами, в том числе  $K_2O$  и  $P_2O_5$ . Концентрации редких и рассеянных элементов в исследуемых субстратах, приведённые в работе [6], ниже кларковых значений и пределов обнаружения использованных методов и не вызывают поводов для беспокойства с точки зрения оценки качества почвогрунтов.

Выращивание растений проводили в пластиковых ёмкостях. В них предварительно помещали субстраты массой 230 г, высушенные до воздушно-сухого состояния. В каждую ёмкость с исследуемым почвогрунтом высаживали по 15 семян ЛР. Предварительно перед посевом семена обрабатывали 0,1% раствором перманганата калия в течение 15 мин для обеззараживания и подсушивали.

Для прорастания семян ёмкости накрывали плёнкой. Первые 3 сут ёмкости с семенами выдерживали без дополнительного освещения. Далее для ускорения прорастания и последующего роста растений использовали подсветку светодиодными фитолампами LED-T5-9W (продолжительность подсветки: 16 ч; длина волны красного спектра (пиковое значение) – 650 нм; длина волны синего спектра (пиковое значение) – 450 нм; угол рассеивания света – 270°). В помещении поддерживали следующие параметры: температура 23 °C, относительная влажность воздуха 91%. Полив производили дистиллированной водой в объёме 50 см<sup>3</sup> через сут.

За ростом и развитием исследуемых растений наблюдали на протяжении всего эксперимента (110 сут) и фиксировали изменения согласно общепринятым методикам, приведённым в руководстве [7].

С целью оценки защитных свойств исследуемых почвогрунтов было изучено влияние стресс-факторов на биохимические параметры ЛР. Исследовалось влияние пониженной температуры ( $8 \pm 2$  °C в течение 14 сут), а также тяжёлых металлов (ТМ), входящих в перечень приоритетных экотоксикантов, – свинца и ртути в концентрациях, соответствующих 10 ПДК<sub>почв.</sub> (для свинца – 320,0 мг/кг, для ртути – 24,0 мг/кг) по СанПиН 1.2.3685-21. В первой группе металлы вносили в субстрат в форме разбавленных растворов государственных стандартных образцов ионов

ртути (II) и свинца 1 г/л, фон – азотная кислота 1М непосредственно при посеве растений, во второй группе – после появления всходов.

Исследование активности ферментов, содержания хлорофилла проводили с использованием свежего растительного материала. В условиях недостаточности растительного материала для проведения аналитической части работы исследование по определению концентрации хлорофилла ( $a$ ,  $b$ ,  $a+b$ ) у растений, находящихся в условиях стресса, не производилось.

Исследование ферментативной активности проводили в белковых экстрактах, для приготовления которых навеску свежих измельчённых листьев массой 0,20–0,50 г (точная навеска) перетирала в ступке с 2-кратным к массе растительного материала объёмом трис-НСI буфера, содержащего 20% сахарозы. Полученный гомогенат центрифугировали на рефрижераторной центрифуге «Eppendorf 5417 R» при 10000 об./мин и  $t = 4$  °C в течение 45 мин, затем отбирали супернатант [8]. Перед исследованием полученные экстракты предварительно разводили в 10 раз. Для расчёта удельной активности ферментов в полученных экстрактах определяли концентрацию белка методом Лоури [9].

Активность каталазы определяли спектрофотометрически в соответствии с методикой [10]. Для спектрофотометрического определения использовали фотометр, изготовленный на базе микроконтроллера Arduino «Uno» со светодиодом в качестве источника излучения и фотодиодом – в качестве детектора, полученные данные контролировали на спектрофотометре ThermoScientific. За единицу активности фермента принимали изменение концентрации пероксида водорода в растворе за 1 мин в расчёте на 1 мг белка.

Активность кислой фосфатазы (КФ) определяли спектрофотометрически по скорости гидролиза модельного субстрата *n*-нитрофенилфосфата [11]. Количество фермента, которое катализирует образование 1 мкмоль *n*-нитрофенола за 1 минуту при 37 °C в расчёте на 1 мг белка, принимали за единицу активности фермента. Активность фермента выражали в международных единицах (МЕ).

Определение содержания хлорофилла в образцах растительных тканей проводили спектрофотометрически по методике [12].

Все исследования проводили в четырёх биологических и трёх аналитических повторностях. Результаты представлены в виде «среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение».

**Результаты и обсуждение**

В таблице 1 представлены данные по всхожести растений. Оптимальная всхожесть проявляется на почве полевого севооборота, а также на почвогрунтах «Klasmann Substrates Select» и «Grunt ЕСО Питательный».

В таблице 2 представлены данные по всхожести растений в условиях повреждающих факторов. По полученным данным, всхожесть лекарственных растений, выращиваемых на плодородном грунте компании «Grunt ЕСО», оказалась в целом несколько ниже, чем всхожесть растений на почве полевого севооборота. В варианте, где ТМ вносили до появления первых всходов, наблюдали наименьшую всхожесть.

В эксперименте, где ТМ вносили после появления всходов, растения погибли на третий день эксперимента.

Данные по содержанию хлорофилла в тканях растений, выращенных на различных субстратах, приведены в таблице 3.

Анализ показал, что у всех растений достигается достаточно высокое содержание хлорофилла *a* и *b*. Особенно это наблюдается у растений, выращенных на техногенном грунте «Grunt ЕСО Питательный». В растениях, выращенных на торфяном грунте («Veltorf»), наблюдаются деструктивные явления. При исследовании тканей чабера горного, выращенного на данном грунте, обнаружено повышенное содержание хлорофилла *b* в сравнении с хлорофиллом *a*. При снижении содержания хлорофилла *a* происходит увеличение синтеза хлорофилла *b*. Этот процесс адаптации частично компенсирует недостаток основного пигмента и позволяет растению нормально функционировать [13]. Кроме того, в вариан-

**Таблица 1 / Table 1**

Всхожесть лекарственных растений в нормальных условиях, %  
Germination of medicinal plants under normal conditions, %

Растение Plant	Почвогрунт / Artificial soil			Почва полевого севооборота (контроль) Soil of field crop rotation (control)
	«Grunt ЕСО» питательный nutritious	«Veltorf» торфяной peat	Klasmann Substrates Select	
Чабер горный ( <i>Satureja montana</i> L.)	81	56	68	83
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	73	42	59	70
Душица обыкновенная ( <i>Origanum vulgare</i> L.)	77	39	43	78
Бasilik обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	85	60	50	75

Примечание: для всех измерений погрешность не превышает 8% отн.  
Note: for all measurements the error does not exceed 8% rel.

**Таблица 2 / Table 2**

Всхожесть лекарственных растений в условиях стресса, %  
Germination of medicinal plants under stress, %

Растение Plant	Условия выращивания / Growing conditions							
	Контроль Control		Внесение Pb, Hg до появления всходов Application of Pb, Hg before germination		Внесение Pb, Hg после появления всходов Application of Pb, Hg after germination		Пониженная температура Low temperature	
	почвогрунт / artificial soil							
	1	2	1	2	1	2	1	2
Бasilik обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	62	78	43	40	35*	90*	45	80
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	53	97	38	55	68*	65*	45	85

Примечание: 1 – плодородный грунт, 2 – почва полевого севооборота; \* – растения погибли в течение трёх сут после внесения в субстрат ТМ. Для всех измерений погрешность не превышает 8% отн.  
Note: 1 – fertile soil, 2 – soil of field crop rotation; \* – the plants died within 3 days after adding HM to the substrate. For all measurements the error does not exceed 8% rel.

Таблица 3 / Table 3

Концентрация хлорофилла в растительных тканях, мг/кг  
Chlorophyll concentration in plant tissues, mg/kg

Растение Plant	Почвогрунт / Artificial soil									Почва полевого севооборота (контроль) Soil of field crop rotation (control)		
	«Grunt ECO» питательный nutritious			«Veltorf» торфяной peat			Klasmann Substrates Select					
	a	b	a+b	a	b	a+b	a	b	a+b	a	b	a+b
Чабер горный ( <i>Satureja montana</i> L.)	1360 ±11	329 ±15	1690 ±8	933 ±12	1052 ±11	1985 ±17	785 ±17	271 ±6	1056 ±9	1156, ±11	506 ±7	1663 ±9
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	1328 ±13	320 ±16	1648 ±12	920 ±4	314 ±6	1235 ±11	1193 ±6	420 ±10	1613 ±14	1286 ±10	309 ±13	1596 ±18
Душица обыкновенная ( <i>Origanum vulgare</i> L.)	1364 ±14	350 ±5	1715 ±8	876 ±17	356 ±19	1233 ±11	611 ±6	409 ±14	1020 ±17	1177 ±5	465 ±9	1634 ±16
Бasilik обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	804 ±9	430 ±12	1234 ±11	403 ±9	229 ±12	633 ±17	737 ±7	224 ±15	962 ±7	576 ±14	238 ±20	859 ±16

Таблица 4 / Table 4

Удельная активность каталазы в нормальных условиях, МЕ/мг белка  
Specific activity of catalase under normal conditions, U/mg protein

Растение Plant	Почвогрунт / Artificial soil			Почва полевого севооборота (контроль) Soil of field crop rotation (control)
	«Grunt ECO» питательный nutritious	«Veltorf» торфяной peat	Klasmann Substrates Select	
Чабер горный ( <i>Satureja montana</i> L.)	0,039±0,001			0,031±0,002
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	0,017±0,003			0,032±0,001
Душица обыкновенная ( <i>Origanum vulgare</i> L.)	0,029±0,003			0,029±0,002
Бasilik обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	0,044±0,002			0,040±0,002

тах с базиликом обыкновенным наблюдаются пониженные концентрации хлорофиллов *a* и *b* (табл. 3).

Для характеристики изменений метаболизма была измерена удельная активность ферментов каталазы и КФ. В результате проведенного исследования были получены следующие значения активности каталазы (табл. 4, 5).

Во всех вариантах грунтов и по всем видам ЛР, значения активности каталазы невысоки, различия между группами не значимы. Функцией каталаз является снижение уровня пероксида водорода и окисление органических

соединений, которые образуются при стрессовых условиях для растения. Повышенная активность каталазы помогает растению справиться с этими стрессовыми условиями и минимизировать негативные последствия [14]. В связи с этим, низкая активность данного фермента свидетельствует об отсутствии метаболического стресса у растений и постоянстве гомеостаза в условиях произрастания.

В экспериментах, где ТМ вносили до появления всходов, удельная активность каталазы в целом повышена в 1,8–3,4 раза, что является логичным результатом контаминации. Существующие исследования указывают на

Таблица 5 / Table 5

Удельная активность каталазы в условиях стресса, МЕ/мг белка  
Specific activity of catalase under stress, U/mg protein

Растение Plant	Условия выращивания / Growing conditions					
	Контроль Control		Внесение ТМ (Pb, Hg) до появления всходов Application of HM (Pb, Hg) before germination		Пониженная температура Low temperature	
	почвогрунт / artificial soil					
	1	2	1	2	1	2
Бasilicum обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	0,027± 0,002	0,030± 0,003	0,092± 0,007	0,054± 0,005	0,046± 0,003	0,039± 0,002
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	0,032± 0,003	0,027± 0,001	0,077± 0,005	0,089± 0,004	0,081± 0,004	0,079± 0,002

Примечание: 1 – плодородный грунт, 2 – почва полевого севооборота.  
Note: 1 – fertile soil, 2 – soil of field crop rotation.

Таблица 6 / Table 6

Удельная активность кислой фосфатазы в нормальных условиях, МЕ/мг белка  
Specific activity of acid phosphatase under normal conditions, U/mg protein

Растение Plant	Почвогрунт / Artificial soils			Почва полевого севооборота (контроль) Soil of field crop rotation (control)
	«Grunt ECO» питательный nutritious	«Veltorf» торфяной peat	Klasmann Substrates Select	
Чабер горный ( <i>Satureja montana</i> L.)	0,042±0,005	0,059±0,003	0,009±0,005	0,059±0,002
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	0,025±0,005	0,110±0,002	1,208±0,001	0,039±0,001
Душица обыкновенная ( <i>Origanum vulgare</i> L.)	0,043±0,004	0,074±0,005	0,098±0,002	0,014±0,006
Бasilicum обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	0,136±0,009	0,130±0,007	1,671±0,002	0,052±0,009

Таблица 7 / Table 7

Удельная активность кислой фосфатазы в условиях стресса, МЕ/мг белка  
Specific activity of acid phosphatase under stress, U/mg protein

Растение Plant	Условия выращивания / Growing conditions					
	Контроль Control		Внесение ТМ (Pb, Hg) до появления всходов Application of HM (Pb, Hg) before germination		Пониженная температура Low temperature	
	почвогрунт / artificial soil					
	1	2	1	2	1	2
Бasilicum обыкновенный ( <i>Ocimum basilicum</i> L.)	0,055 ±0,004	0,038 ±0,003	0,101 ±0,002	0,091 ±0,004	0,043 ±0,006	0,049 ±0,003
Алтей лекарственный ( <i>Althaea officinalis</i> L.)	0,047 ±0,002	0,060 ±0,001	0,064 ±0,005	0,077 ±0,004	0,062 ±0,002	0,070 ±0,002

Примечание: 1 – плодородный грунт, 2 – почва полевого севооборота.  
Note: 1 – fertile soil, 2 – soil of field crop rotation.

повышение активности каталазы растений при воздействии ТМ. Так, выявлено повышение активности каталазы в растениях риса при воздействии свинца, при этом токсическое действие ТМ для растения снижается [15]. Таким образом, у растений, выращенных на плодородном грунте, отмечают более вы-

сокие значения активности каталазы, чем у растений, выращенных на почве полевого севооборота. Экспозиция растений при пониженной температуре также повлияла на метаболические процессы: удельная активность фермента повысилась в 1,4–3 раза по сравнению с контролем.

Увеличенная активность КФ (табл. 6, 7) свидетельствует, как правило, о дефиците фосфора в растительных тканях, поскольку этот фермент катализирует гидролиз фосфатов и является важным компонентом цикла фосфора.

Выявленная активность фермента КФ находится в пределах нормы, причём у растений, выращенных на питательном грунте (табл. 6), отмечена самая низкая активность КФ. Однако, активность КФ повышена в растениях, выращенных на почвогрунте «Klasmann Substrates Select».

При внесении ТМ в субстраты активность КФ в растениях повышается (табл. 7). Увеличение активности фермента и числа его множественных форм свидетельствуют о резистентности организма, которая характеризуется снижением скорости протекания гидролитических реакций и усилением процессов синтеза, в том числе белков. Таким образом, повышение активности КФ является одним из механизмов адаптации растений к стрессу, вызванному ТМ.

Понижение температуры воздуха и другие экологические факторы могут оказывать различное влияние на активность КФ у живых объектов [16–18], нами выявлено небольшое повышение активности фермента.

### Заключение

Результаты, полученные при оценке всхожести и биохимических параметров (активности КФ, активности каталазы и концентрации хлорофилла) лекарственных растений на разных почвогрунтах, позволяют сделать заключение о пригодности использованных почвогрунтов для выращивания лекарственных растений. Оптимальным из исследованных почвогрунтов является техногенный питательный грунт компании «Grunt ECO», полученный методом твёрдофазной ферментации отходов IV и V классов опасности, который, по оценке, проведённой ранее [6], имеет наиболее высокое содержание питательных веществ в сравнении с остальными исследованными почвогрунтами.

При внесении в грунты свинца и ртути, а также при понижении температуры воздуха у лекарственных растений наблюдается устойчивая реакция стресса, сопровождающаяся увеличением активности ферментов – каталазы и КФ, что является признаками адаптации. Таким образом, исследованные почвогрунты в достаточной мере обеспечивают защиту растений от неблагоприятных воздействий.

*Исследование выполнено в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства, предусмотренного постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218 по теме «Высокотехнологичное производство грунтов методами инновационной переработки отходов» (контракт № 075-11-2021-059 от «24» июня 2021 г., идентификатор государственного контракта 000000S407521QL90002).*

*При проведении исследования использовано приборно-методическое обеспечение на базе «Ардуино», разработанное в соответствии с государственным заданием (выполнение работ) № 073-00078-23-00 от 19.01.2023.*

### Литература

1. Глинушкин А.П., Свиридова Л.Л., Севостьянов М.А., Сычева И.И., Гришина Е.В. Почвогрунт: обзор методов получения и возможностей применения // Биотика. 2018. № 6. Вып. 25. С. 10–19.
2. ООО «Автодизель» [Электронный ресурс] <https://www.avtodizel.ru/grunt/> (Дата обращения: 23.08.2023).
3. ООО «Грунтофф» [Электронный ресурс] <https://gruntoff.ru/> (Дата обращения: 23.08.2023).
4. GRUNTECO [Электронный ресурс] <https://grunteco.com/ru/tekhнология/> (Дата обращения: 23.08.2023).
5. Неклюдов А.Д., Федотов Г.Н., Иванкин А.Н. Интенсификация процесса компостирования при помощи аэробных микроорганизмов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2008. Т. 44. № 1. С. 9–23.
6. Чепрасова А.С., Севостьянов М.А., Новикова Н.Г., Колкова А.А., Маршева А.В., Петренко Д.Б., Васильев Н.В. Оценка качества почвогрунтов и их компонентов по показателям содержания неорганических веществ // Агрехимический вестник. 2023. № 3. С. 70–74.
7. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М., 2011. 650 с.
8. Gilbert G.A., Knight J.D., Vance C.P., Allan D.L. Acid phosphatase activity in phosphorus-deficient white lupin roots // Plant, Cell and Environment. 1999. V. 22. No. 7. P. 801–810.
9. Lowry O.H., Rosenbrought N.J., Farr A.L., Rangel R.L. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent // Journal of Biological Chemistry. 1951. V. 193. No. 2. P. 265–275.
10. Sinha A.K. Colorimetric assay of catalase // Analytical Biochemistry. 1972. V. 47. No. 2. P. 389–394.
11. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of P-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // American Journal of Clinical Pathology. 1947. V. 17. No. 7. P. 571–574.
12. Barnes J.D., Balaguer L., Manrique E., Elvira S., Davison A.W. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls *a* and *b* in

lichens and higher plants // *Environmental and Experimental Botany*. 1992. V. 32. No. 2. P. 85–100.

13. Кунина В.А., Белоус О.Г. Состояние фотосинтетических пигментов листьев древесных растений в условиях городской среды // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2020. Т. 6 (72). № 2. С. 108–118.

14. Sharma I., Ahmad P. Catalase. Oxidative damage to plants // *Oxidative Damage to Plants* / Ed. P. Ahmad. Amsterdam: Elsevier, 2014. 131–148.

15. Verma S., Dubey R.S. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants // *Plant Science*. 2003. V. 164. No. 4. P. 645–655.

16. Иваченко Л.Е., Селихова О.А., Ала А.Я., Ала В.С. Влияние погодных условий выращивания на биохимический состав семян и морфологические показатели дикорастущей сои // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2011. № 4 (158). С. 67–72.

17. Козак Д.К., Иваченко Л.Е., Голохваст К.С. Изменение биохимических показателей сои в зависимости от условий выращивания // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2022. Т. 52. № 1. С. 16–24.

18. Дроганова Т.С., Поликарпова Л.В., Коничев А.С. Белковые спектры печени живородки речной в норме и при интоксикации ионами свинца(II) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2019. № 3. С. 109–113.

## References

1. Glinushkin A.P., Sviridova L.L., Sevostyanov M.A., Sycheva I.I., Grishina E.V. Artificial soil: overview of production methods and application possibilities // *Biotika*. 2018. No. 6 (25). P. 10–19 (in Russian).

2. “Avtodiezel” [Internet resource] <https://www.avtodiezel.ru/grunt/> (Accessed: 23.08.2023).

3. “Gruntoff” [Internet resource] <https://gruntoff.ru/> (Accessed: 23.08.2023).

4. GRUNTECO [Internet resource] <https://grunteco.com/ru/tehnologia/> (Accessed: 23.08.2023).

5. Neklyudov A.D., Fedotov G.N., Ivankin A.N. Intensification of the composting process using aerobic microorganisms (review) // *Applied biochemistry and microbiology*. 2008. V. 44. No. 1. P. 9–23.

6. Cheprasova A.S., Sevostyanov M.A., Novikova N.G., Kolkova A.A., Marsheva A.V., Petrenko D.B., Vasilev N.V. Assessment of the quality of soils and their components based on the content of inorganic substances // *Agrochemical Herald*. 2023. No. 3. P. 70–74 (in Russian). doi: 10.24412/1029-2551-2023-3-015

7. Litvinov S.S. Methodology of field experiment in vegetable growing. Moskva, 2011. 650 p. (in Russian).

8. Gilbert G.A., Knight J.D., Vance C.P., Allan D.L. Acid phosphatase activity in phosphorus-deficient white lupin roots // *Plant, Cell and Environment*. 1999. V. 22. No. 7. P. 801–810. doi: 10.1046/j.1365-3040.1999.00441.x

9. Lowry O.H., Rosenbrought N.J., Farr A.L., Rangel R.L. Protein measurement with the Folin Phenol Reagent // *Journal of Biological Chemistry*. 1951. V. 193. No. 2. P. 265–275.

10. Sinha A.K. Colorimetric assay of catalase // *Analytical Biochemistry*. 1972. V. 47. No. 2. P. 389–394. doi: 10.1016/0003-2697(72)90132-7

11. Andersch M.A., Szczypinski A.J. Use of P-nitrophenylphosphate as the substrate in determination of serum acid phosphatase // *American Journal of Clinical Pathology*. 1947. V. 17. No. 7. P. 571–574. doi: 10.1093/ajcp/17.7\_ts.571

12. Barnes J.D., Balaguer L., Manrique E., Elvira S., Davison A.W. A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophylls *a* and *b* in lichens and higher plants // *Environmental and Experimental Botany*. 1992. V. 32 No. 2. P. 85–100. doi: 10.1016/0098-8472(92)90034-Y

13. Kunina V.A., Belous O.G. The state of photosynthetic pigments of leaves of woody plants in an urban environment // *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2020. V. 6 (72). No. 2. P. 108–118 (in Russian). doi: 10.37279/2413-1725-2020-6-2-108-118

14. Sharma I., Ahmad P. Catalase. Oxidative damage to plants // *Oxidative Damage to Plants* / Ed. P. Ahmad. Amsterdam: Elsevier, 2014. P. 131–148. doi: 10.1016/b978-0-12-799963-0.00004-6

15. Verma S., Dubey R.S. Lead toxicity induces lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants // *Plant Science*. 2003. V. 164. No. 4. P. 645–655. doi: 10.1016/s0168-9452(03)00022-0

16. Ivachenko L.E., Selikhova O.A., Ala A. Ya., Ala V.S. The influence of growing weather conditions on the biochemical composition of seeds and morphological parameters of wild soybeans // *Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences*. 2011. No. 4 (158). P. 67–72 (in Russian).

17. Kozak D.K., Ivachenko L.E., Golokhvast K.S. Changes in the biochemical parameters of soybeans depending on the growing conditions // *Siberian Herald of Agricultural Science*. 2022. V. 52. No. 1. P. 16–24 (in Russian).

18. Droganova T.S., Polikarpova L.V., Konichev A.S. River snail liver protein spectrum in normal conditions and when intoxicated with lead(II) ions // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 109–113 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-109-113

## Диагностика процессов почвообразования в аллювиальных луговых почвах речных долин таёжно-лесной и степной зон

© 2023. П. Н. Балабко<sup>1</sup>, д. б. н., профессор,  
Е. М. Лаптева<sup>2</sup>, к. б. н., зав. отделом,  
А. А. Снег<sup>1</sup>, к. б. н., инженер,

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
119234, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12,

<sup>2</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: lapteva@ib.komisc.ru

Обобщены многолетние данные, полученные при изучении широкого спектра аллювиальных почв, формирующихся на пойменных террасах рек таёжно-лесной и степной зон Европейской и Западно-Сибирской равнин. С использованием методов микроморфологии и растровой электронной микроскопии исследовано микростроение аллювиальных почв центральной части пойменных террас ряда крупных рек – Оби, Печоры, Северной Двины, Угры, Оки, Десны, Клязьмы, Тихой Сосны. Выявлены особенности и диагностические признаки поемно-аллювиальных и элементарных почвообразовательных процессов, определяющих формирование профиля аллювиальных луговых почв. Показано, что для всех биоклиматических зон характерны высокая агрегированность и пористость гумусоаккумулятивных горизонтов, при этом в таёжно-лесной зоне формируется гумус типа мулль и модер, в степной – только мулль. Диагностическими признаками зональности аллювиальных луговых почв являются форма и размеры Fe-Mn-новообразований, наличие глинистых натёков и кутан, гипса и карбонатов. В таёжно-лесной зоне экологические условия высокой поймы маркируют присутствие Fe-Mn-новообразований в форме нодулей и наличие глинистых натёков в нижней части профиля, низкой поймы – присутствие Fe-Mn-новообразований в форме хлопьев и пятен, глинистых кутан (плёнок) в порах и вокруг агрегатов в нижней части профиля. Для аллювиальных луговых почв степной зоны характерно формирование в нижней части профиля новообразований из гипса и карбонатов, и отсутствие – кутан иллювиирования. Интенсивное агрогенное использование аллювиальных луговых почв способствует дезагрегации пахотного горизонта, вымыванию из него аморфных форм гумуса, переориентации глинистых минералов в горизонтальное расположение в горизонтах, располагающихся ниже плужной подошвы.

**Ключевые слова:** аллювиальные почвы, микроморфологическое строение, почвообразование, процессы, признаки, диагностика.

## Diagnostics of soil formation processes in alluvial meadow soils of river valleys in taiga-forest and steppe zones

© 2023. P. N. Balabko<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-4612-3861<sup>1</sup>  
E. M. Lapteva<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-9396-7979<sup>2</sup>  
A. A. Sneg<sup>1</sup> ORCID: 0009-0006-7865-1534<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University named after M. V. Lomonosov,  
1/12, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119234,

<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: lapteva@ib.komisc.ru

Long-term data obtained from studying a wide range of alluvial soils formed on floodplain terraces of rivers in the taiga-forest and steppe zones of the European and West Siberian Plains are summarized. The microstructure of alluvial soils in the central part of the floodplain terraces of a number of large rivers such as the Ob, Pechora, Northern Dvina, Ugra, Oka, Desna, Klyazma and Tikhaya Sosna Rivers was studied using the methods of micromorphology and scanning electron microscopy. We identified the features and diagnostic signs of flood-alluvial and elementary soil-forming

processes that determine the formation of the profile of alluvial meadow soils. All bioclimatic zones are characterized by high aggregation and porosity of humus-accumulative horizons. However, humus of the mull and moder type is formed in the taiga-forest zone, while in the steppe – only mull. Diagnostic signs of zonality in alluvial meadow soils are the shape and size of Fe-Mn formations, clay deposits and cutans, gypsum and carbonates. In the taiga-forest zone the ecological conditions of the high floodplain are marked by the presence of Fe-Mn new formations in the form of nodules and the presence of clay deposits in the lower part of the profile. At the same time, the low floodplain is marked by Fe-Mn new formations in the form of flakes and spots, clay cutans (films) in the pores and around the units at the bottom of the profile. Alluvial meadow soils of the steppe zone are characterized by the presence of new formations of gypsum and carbonates in the lower part of the profile, and the absence of illuvial cutans. Intensive agrogenic use of alluvial meadow soils promotes the disaggregation of the humus-accumulative horizon, the leaching of amorphous forms of humus from it, and the reorientation of clay minerals into a horizontal arrangement in the horizons located below the plow base.

**Keywords:** alluvial soils, micromorphological structure, soil formation, processes, features, diagnostics.

Аллювиальные пойменные почвы занимают особое место в мире почв. Они относятся к категории наиболее молодых и очень динамичных образований в системе почвенного покрова Земли, и представлены во всех биоклиматических зонах и подзонах [1]. Формирование аллювиальных почв в пределах пойменных террас осуществляется под влиянием сложного сочетания собственно почвообразовательных процессов и таких интразональных факторов, связанных с ежегодными паводками, как поёмность и аллювиальность [2]. Отложение аллювия на поверхность почв (аллювиальность) и их развитие в течение определённого периода времени в условиях затопления паводковыми водами (поёмность) нарушают естественный ход протекания элементарных почвенных процессов. Это обусловило отрицание многими исследователями в течение длительного времени роли зональных факторов в формировании почв пойменных террас. Полученные к настоящему времени данные о морфологических и физико-химических свойствах широкого спектра пойменных почв, представленных в долинах рек Восточной Европы и Западной Сибири, подтвердили значимое влияние биоклиматических факторов на развитие их профиля [1, 3]. Почвенный покров пойменных террас, несмотря на их небольшие относительно водораздельных пространств площади, характеризуется значительным разнообразием почв. Оно обусловлено разнообразием условий формирования речных долин, разнообразием минералогического и гранулометрического состава размываемых речными потоками четвертичных отложений, спецификой растительного покрова пойм, особенностями климата и пр. Все эти факторы оказывают соответствующее влияние на скорость и направленность как процессов седиментогенеза, так и собственно почвообразовательных процессов. В связи с этим, при исследовании генезиса аллювиальных почв важным является

диагностика аллювиально-пойменных и элементарных почвенных процессов, определяющих дифференциацию профиля почв пойменных террас и маркирующих этапы их природной и антропогенной трансформации [4, 5].

Цель данной работы заключалась в выявлении диагностических признаков седиментогенеза и поёмности, а также элементарных процессов почвообразования в аллювиальных луговых почвах таёжно-лесной и степной зон на основе изучения их микростроения.

### Объекты и методы исследования

Проведено обобщение многолетних данных о микростроении аллювиальных луговых почв, исследованных авторами на типичных отрезках пойм рек Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. Объектами исследования послужили почвы рек таёжной зоны – Оби [6], Печоры [7], Северной Двины [3], Угры и Оки [8, 9], Десны [3, 10], Клязьмы [3, 11]. Изучение особенностей микростроения аллювиальных луговых почв степной зоны проводили на примере поймы р. Тихая Сосна (Воронежская область) [12].

Микроморфологические исследования аллювиальных почв выполняли в соответствии с методическими руководствами [13–17]. Описание микростроения почв проводили в ориентированных (верх/низ) плоскопараллельных шлифах, приготовленных из образцов ненарушенных почв. Процесс просмотра и описания шлифов нами усовершенствован за счёт объединения в единый комплекс поляризованного микроскопа ПОЛАМ 312 и стационарного компьютера. Это позволило проводить просмотр в течение короткого времени значительно большего количества микронзон в шлифах и фиксировать их фотографические изображения. В ряде случаев при изучении структурных особенностей почв использовали метод растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Для установления классификационного положения аллювиальных почв использовали принципы их диагностики и классификации, предложенные Г. В. Добровольским [2] и реализованные в «Классификации и диагностике почв СССР» [18].

### Результаты и обсуждение

**Особенности формирования почв в поймах рек и их классификация.** Классификация аллювиальных пойменных почв, разработанная Г. В. Добровольским [2], носит универсальный характер. Исследованиями многих авторов показана возможность её применения при изучении почвенного покрова пойменных террас рек как гумидных, так и аридных областей [1]. Многие отечественные исследователи, наряду с современной субстантивно-генетической «Классификацией и диагностикой почв России» 2004 г. [19], продолжают активно использовать классификацию Г. В. Добровольского и в настоящее время [10, 20].

Согласно этой классификации [2, 18], в зависимости от характера водного режима и условий почвообразования в поймах рек принято выделять три основные группы типов аллювиальных почв – дерновые, луговые и болотные. С учётом зональных условий, особенностей гранулометрического и минералогического составов размываемого аллювия, специфики засоления высокоминерализованными грунтовыми водами в каждой группе выделяют типы по степени насыщенности основаниями – кислые (ненасыщенные основаниями), насыщенные основаниями (нейтральные и слабокислые), карбонатные (насыщенные основаниями, имеют слабощелочную реакцию среды). На уровне рода выделяют засоленные и солонцеватые почвы [18]. Специфика формирования пойменных террас, разнообразие складывающихся в их пределах экологических условий определяют значительное разнообразие типов и подтипов аллювиальных почв.

Во всех биоклиматических зонах наиболее плодородными почвами являются аллювиальные луговые почвы [1, 2, 7, 8, 10, 16, 21]. Они занимают плоские невысокие гривы и пониженные выровненные пространства центральной поймы, где почвообразование идёт на суглинистом и глинистом аллювии. Близкое залегание почвенно-грунтовых вод (1–2 метр почвенного профиля) и ежегодная влагозарядка гумусоаккумулятивных горизонтов в период паводка способствуют

преимущественному формированию на таких почвах высокопродуктивных мезофитных и мезофитно-гигрофитных лугов. Морфологически профиль аллювиальных луговых почв характеризуется развитием мощного гумусоаккумулятивного горизонта (A1) с хорошо выраженной зернистой или комковато-зернистой структурой, формированием в срединной части профиля переходного по содержанию гумуса горизонта с признаками оглеения (Bg), залегающим на подстилающем аллювии различного гранулометрического состава (Cg).

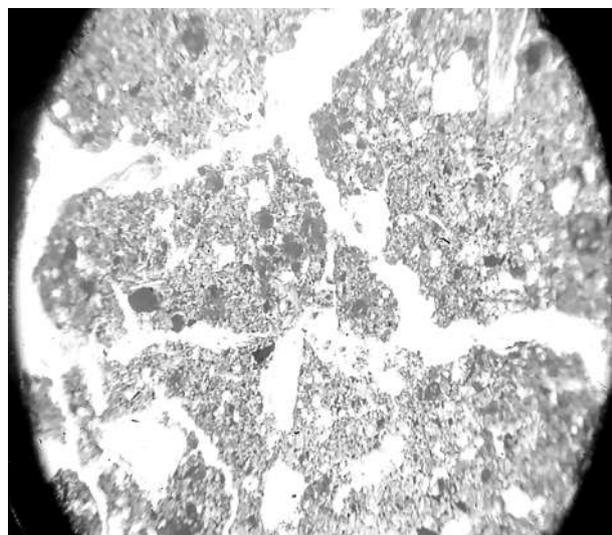
Благодаря господству в центральной пойме высокопродуктивных луговых сообществ, в аллювиальных луговых почвах ведущим почвообразовательным процессом, определяющим развитие их профиля, является дерновый процесс. На его протекание и дифференциацию профиля аллювиальных луговых почв существенное влияние оказывают также процессы седиментации паводкового аллювия на поверхность поймы (в силу снижения скорости потока полых вод в центральной части пойменных террас происходит оседание преимущественно тонких, обогащённых биофильными элементами наилок), а также особенности водного режима (глубина залегания почвенно-грунтовых вод, их химический состав, высота подъёма и мощность капиллярной каймы). Все отмеченные факторы способствуют развитию в аллювиальных луговых почвах комплекса элементарных почвообразовательных процессов – таких, как интенсивное гумусообразование и гумусонакопление, биогенное и гидроморфное оструктурирование, оглеение, ожелезнение, оруденение и окарбонирование, степень выраженности которых во многом зависит от зональных условий региона и специфики формирования пойменной террасы (её геоморфологии, особенностей русловых процессов, степени дренированности поймы и т.д.).

Процессы седиментогенеза в профиле аллювиальных луговых почв морфологически могут быть выражены в виде сочетания прослоек аллювия различного гранулометрического состава. Такой профиль характерен для подтипов аллювиальных луговых слоистых примитивных и слоистых почв, которые можно встретить на пониженных участках прирусловой части поймы, косах и пойменных островах. В подтипах собственно аллювиальных луговых почв морфологически процессы аллювиальности и поёмности практически не выражены – профиль почвы однороден, характеризуется постепенным переходом от гумусоаккумулятивного гори-

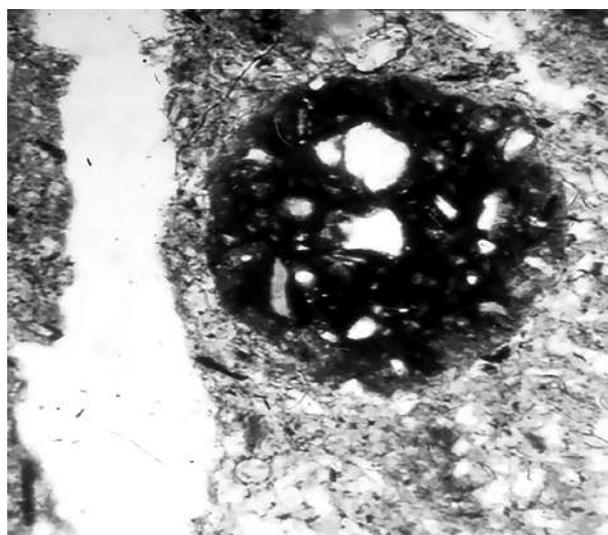
зонта А1 к переходному Вg. Однако процессы седиментогенеза могут быть диагностированы при изучении микростроения верхней части гумусоаккумулятивных горизонтов – по их микрослоистости, слабой связи органического вещества и минерального скелета, хорошей окатанности песчаных зёрен, горизонтальному расположению удлинённых минералов и растительных остатков.

**Микростроение аллювиальных луговых кислых почв.** Микроморфологическое описание широкого спектра аллювиальных луговых кислых почв, формирующихся в долинах рек таёжно-лесной зоны, позволило выявить ряд

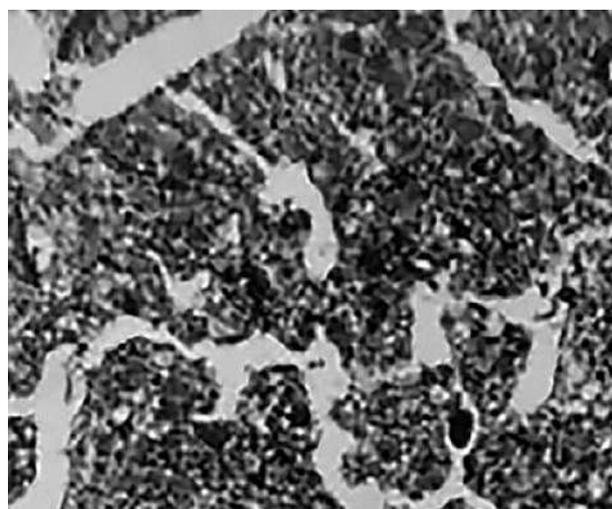
особенностей в специфике протекания в их профилях почвообразовательных процессов в зависимости от высоты пойменной террасы и, соответственно, длительности затопления почв в период паводка и их дренированности в послепаводковый период. Изучение микростроения аллювиальных луговых кислых почв высокой поймы свидетельствует об их активном формировании под влиянием процессов гумусообразования, гумусонакопления и биогенного оструктурирования. Микросложение гумусоаккумулятивных горизонтов таких почв агрегированное с преобладанием агрегатов 2 порядка и выраженной межагрегатной



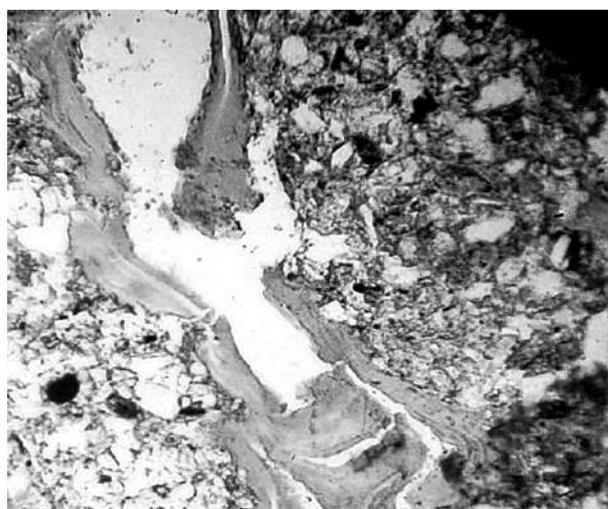
А / А



Б / В



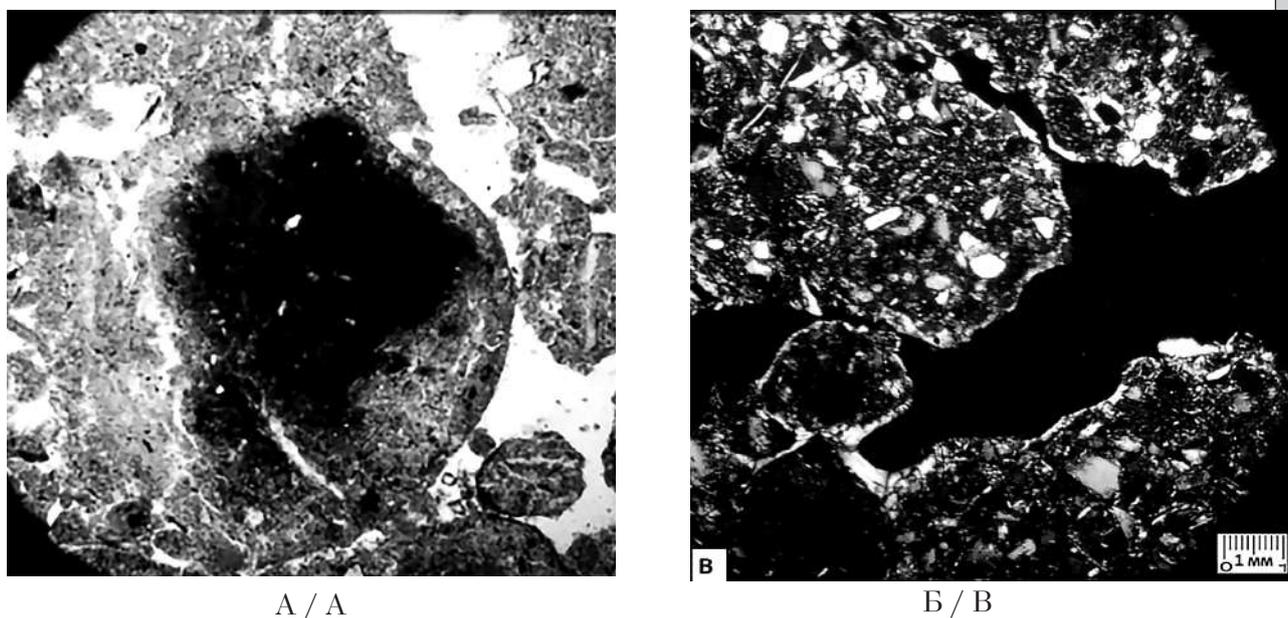
В / С



Г / D

**Рис. 1.** Микростроение аллювиальных луговых кислых почв высокой поймы на примере долины р. Оби (увеличение  $\times 90$ , николи параллельные): агрегированность (А) и железо-марганцевые нодули (Б) в гумусоаккумулятивном горизонте (гор. А1, глубина 0–30 см); пористость (В) и глинистые натёки (Г) в переходном горизонте Вg (глубина 30–55 и 55–70 см соответственно)

**Fig. 1.** Microstructure of alluvial meadow acidic soils of a high floodplain using the example of the Ob river valley (magnification  $\times 90$ , nicols parallel): aggregation (А) and iron-manganese nodules (Б) in the humus-accumulative horizon (horizon А1, depth 0–30 cm); porosity (С) and clay deposits (D) in the transition horizon Вg (depth 30–55 and 55–70 cm, respectively)



**Рис. 2.** Микростроение аллювиальных луговых кислых почв низкой поймы на примере долины р. Оби: А – агрегированность и железо-марганцевые пятна в гумусоаккумулятивном горизонте (гор. А1, глубина 0–30 см; увеличение  $\times 90$ , николи параллельные); Б – пористость и глинистые кутаны в переходном горизонте (гор. Вg, глубина 50–68 см; увеличение  $\times 90$ , николи скрещенные)  
**Fig. 2.** Microstructure of alluvial meadow acidic soils of a low floodplain using the example of the Ob river valley: А – aggregation and iron-manganese spots in the humus-accumulative horizon (А1 horizon, depth 0–30 cm; magnification  $\times 90$ , nicols parallel); В – porosity and clay cutans in the transition horizon (Вg horizon, depth 50–68 cm; magnification  $\times 90$ , nicols crossed)

разветвлённой пористостью (рис. 1А). Органическое вещество представлено гумусом типа мулль и модер. Среди марганцовисто-железистых новообразований преобладают нодули (рис. 1Б)

Переходные горизонты Вg, имеющие признаки оглеения в виде сизоватых пятен в профиле, также хорошо агрегированы, с ажурно-ветвистой пористостью (рис. 1В). Для них характерно присутствие осветлённых микрозон и равномерное распределение дисперсного гумуса. В некоторых порах, особенно на глубине 55–70 см, зафиксированы в шлифах отчётливо выраженные глинистые натёки (рис. 1Г). Они обнаружены нами в шлифах из горизонтов Вg аллювиальных луговых кислых почв высокой поймы в долинах рек Средней Оби, Печоры, Десны, Оки, Клязьмы [6–8]. Кроме того, в горизонте Вg аллювиальной луговой кислой почвы, формирующейся в пойме р. Десны (подзона южной тайги), были обнаружены кутаны, включающие зёрна кварца.

Присутствие глинистых натёков в нижней части профиля аллювиальных луговых почв, занимающих высокие гривы в центральной части пойменных террас таёжно-лесных рек, свидетельствует об их дифференциации по элювиально-иллювиальному типу и тенденции формирования на пойменных

террасах в долинах рек почвенных профилей подобно зональным подзолистым и дерново-подзолистым почвам [22, 23]. Однако по сравнению с зональными почвами, кутаны иллювиирования в аллювиальных почвах как правило молодые, слабонарушенные, без включения соединений железа и гумуса. Присутствие в составе кутан зёрен кварца может свидетельствовать о возможности протекания в пойменных почвах таёжно-лесной зоны процессов партлювации [24].

Формирование аллювиальных луговых кислых почв в условиях низкой поймы осложняется более высоким уровнем залегания почвенно-грунтовых вод и более длительным периодом затопления паводковыми водами, по сравнению с участками высокой поймы. Это нашло своё отражение в макро- и микростроении почв. Как правило, профиль аллювиальных луговых кислых почв низкой поймы долин рек Средней Оби, Печоры, Десны слабее дифференцирован на генетические горизонты. В их гумусоаккумулятивных горизонтах преобладают макроагрегаты 1 и 2 порядков, а марганцовисто-железистые новообразования имеют форму пятен (рис. 2А). Много углистых частиц, ожелезнённых растительных остатков, гумус типа модер. Эти признаки свидетельствуют о более гидроморфных условиях формирова-

ния таких почв, по сравнению с аллювиальными луговыми почвами высокой поймы.

Глинистые натёки представлены однослойными обезжелезненными тонкими глинистыми плёнками (кутанами) вдоль пор и вокруг агрегатов (рис. 2Б). Сезонное оглеение верхних горизонтов исследуемых почв в осенний и весенний периоды приводит к диспергации почвенной массы, что способствует иллювированию железисто-глинистой плазмы в нижележащие горизонты. Однако этот процесс протекает более интенсивно в аллювиальных луговых почвах высокой поймы (в условиях лучшего дренажа), по сравнению с почвами низкой поймы, отличительной чертой водного режима которых является слабая дренированность территории.

Анализ микростроения аллювиальных луговых кислых почв, формирующихся в условиях высокой и низкой поймы, свидетельствует о высокой пористости их профиля. В них диагностированы такие почвообразовательные процессы, как биоморфное и гидроморфное оструктурирование, глееобразование и ожелезнение, лессиваж. На глобальное распространение глеевого процесса в различных типах почв, в том числе и пойменных, обратил внимание Ф.Р. Зайдельман [25].

Наличие железистых новообразований и глинистых кутан в профиле аллювиальных луговых кислых почв свидетельствуют о том, что ещё на пойменной стадии их эволюционного развития в них начинают формироваться признаки зональных таёжно-лесных почв. Разнообразие и форма новообразований и кутан иллювиования являются диагностическими признаками экологических условий почвообразования. В условиях высокой поймы (хороший дренаж, залегание зеркала почвенно-грунтовых вод во втором метре почвенного профиля) Fe-Mn-новообразования представлены нодулями, глинистое вещество имеет натёчную форму. В условиях низкой поймы (слабая дренированность, зеркало грунтовых вод во втором полуметре профиля) марганцовисто-железистые новообразования имеют форму пятен, глинистые кутаны – однослойные, выстилают стенки пор.

**Микростроение аллювиальных луговых насыщенных почв.** При изучении микростроения аллювиальных луговых насыщенных почв, представленных в пределах пойменных террас долин рек степной зоны (Верхняя Обь, Верхний Чулым, Тихая Сосна) [1, 6, 12], нами выявлен ряд отличительных признаков. Гумусоаккумулятивные горизонты таких почв характеризуются высокой макро- и микро-

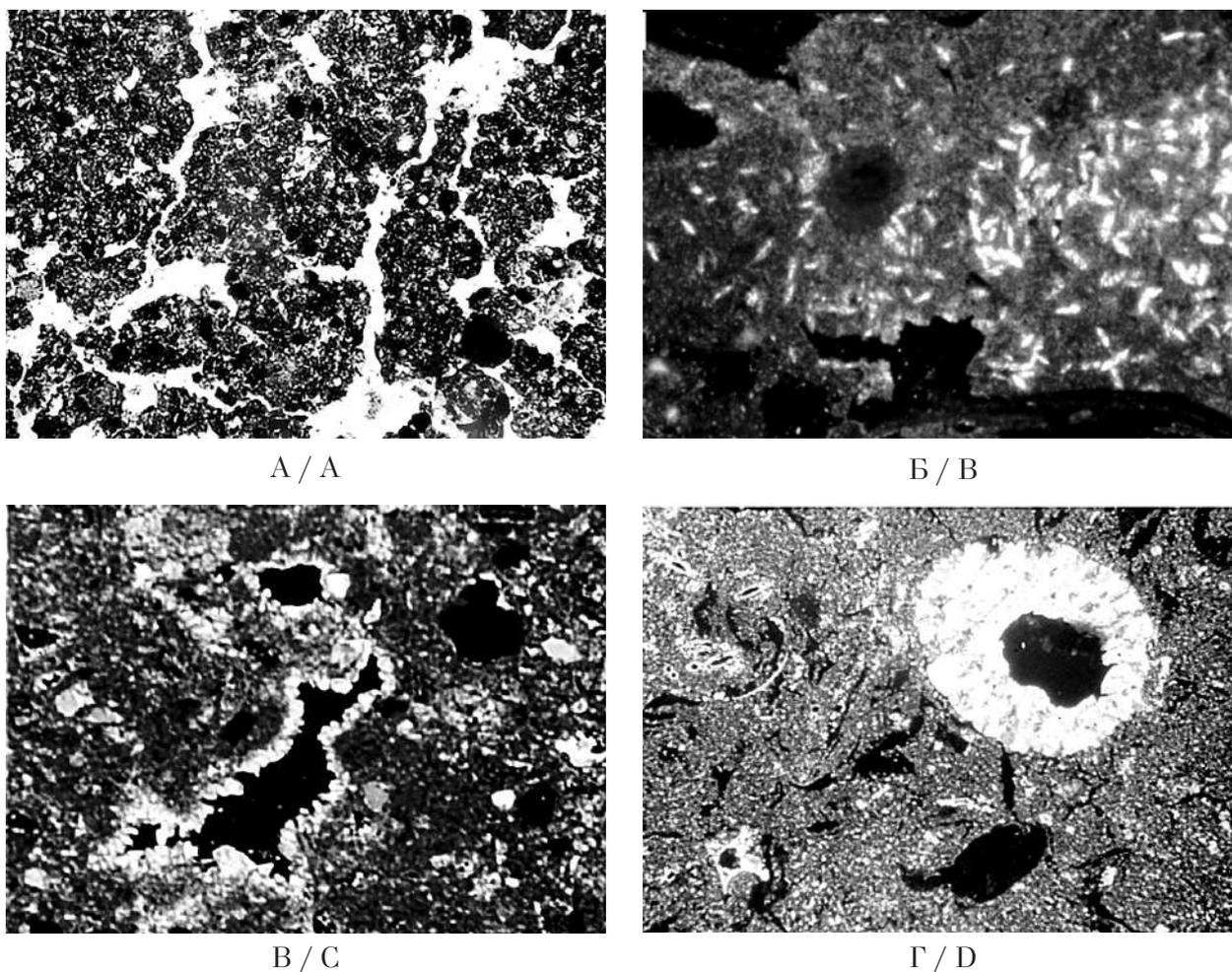
агрегированностью, компактным микро-сложением, хорошо развитой межагрегатной пористостью (рис. 3А). Гумусо-глинистая плазма скоагулирована, гумус типа мулль.

Заметных признаков передвижения по профилю луговых насыщенных почв глинистой плазмы не обнаружено – в нижних горизонтах этих почв натёчные формы глины отсутствуют. В некоторых микрizonaх встречаются Fe-Mn-новообразования в форме хлопьев, пятен и мелких нодулей. Характерной чертой аллювиальных луговых насыщенных почв степной зоны является присутствие кристаллов гипса (рис. 3Б) и различных форм карбонатов (рис. 3В, Г) в нижней части профиля, находящейся в зоне влияния почвенно-грунтовых вод. Карбонаты представлены, как правило, карбонатной плазмой и крупнозернистым кальцитом в порах.

Таким образом, к микроморфологическим признакам зональности аллювиальных луговых насыщенных почв степной зоны можно отнести наличие в нижних горизонтах гипса и различных форм карбонатов, а также отсутствие глинистых натёков и кутан.

**Диагностика агрогенной трансформации аллювиальных луговых почв.** Почвы пойменных террас рек во всех биоклиматических зонах и подзонах являются основой развития сельскохозяйственного производства. Использование пойменных лугов в качестве сенокосов и пастбищ, как правило, мало влияет на свойства аллювиальных почв [4]. Основные изменения в данном случае связаны с уменьшением содержания и запасов гумуса в связи с изъятием части надземной фитомассы травостоев из биологического круговорота веществ [7]. Существенное преобразование морфологических и физико-химических свойств наблюдается при использовании пойменных террас рек для создания пахотных угодий с целью выращивания культурных растений в открытом грунте [4, 9, 10, 26]. Интенсивное агрогенное воздействие на аллювиальные почвы находит своё отражение в изменении их макро- и микростроения.

На примере аллювиальных почв долины реки Ока, находящихся в режиме интенсивного земледелия (мелиорация, внесение минеральных удобрений, орошение, выращивание овощей), нами выполнены комплексные исследования, включающие в том числе применение методов микроморфологии и сканирующей электронной микроскопии [9]. Показано, что при распаивании аллювиальных почв в их профиле морфологически вычленяется



**Рис. 3.** Микростроение аллювиальной луговой насыщенной почвы на примере поймы р. Тихая Сосна: А – макро- и микроагрегированность гумусоаккумулятивного горизонта (гор. А1, глубина 0–20 см; увеличение  $\times 90$ , николи параллельные); Б – кристаллы гипса; В – тонкозернистый кальцит; Г – крупнозернистый кальцит в порах нижней части переходного горизонта (гор. Вг, глубина 60–70 см; увеличение  $\times 90$ , николи скрещенные)

**Fig. 3.** Microstructure of alluvial meadow saturated soil using the example of the Tikhaya Sosna river floodplain: А – macro- and microaggregation of the humus-accumulative horizon (А1 horizon, depth 0–20 cm; magnification  $\times 90$ , nicols parallel); В – gypsum crystals; С – fine-grained calcite; D – coarse-grained calcite in the pores of the lower part of the transition horizon (Bg horizon, depth 60–70 cm; magnification  $\times 90$ , nicols crossed)

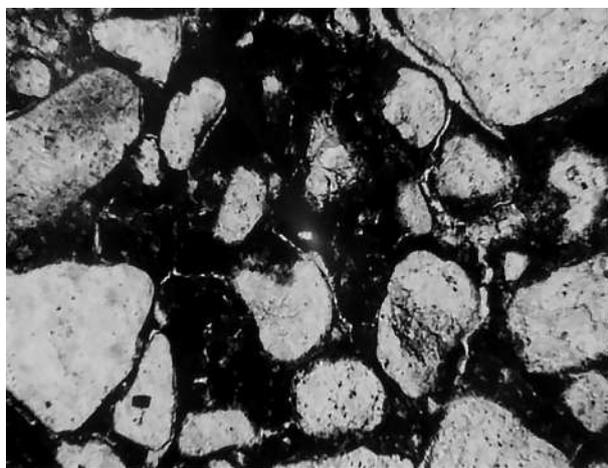
чётко выраженный пахотный горизонт, происходит переуплотнение подпахотных горизонтов и образование плужной подошвы.

Для пахотных горизонтов агрогенно трансформированных пойменных почв характерно интертекстурное строение (рис. 4А), отличительной чертой которого является погружение зёрен минералов в тонкопористую плазму или их связывание друг с другом за счёт образования плазменных мостиков. Кроме того, в шлифах фиксируется потеря аморфных форм гумуса и появление марганцовисто-железистых новообразований (рис. 4Б), образование которых связано с временным переувлажнением верхних горизонтов в результате снижения фильтрационной способности переуплотнённой плужной подошвы.

В результате давления почвообрабатывающей и уборочной техники в горизонте В, располагающемся ниже подплужной подошвы, формируются своеобразные вторичные глинистые новообразования (рис. 4В). Здесь же присутствуют глинистые домены с горизонтальным расположением чешуек глиен (рис. 4Г). Горизонтальное расположение чешуек вторичных глинистых минералов можно рассматривать в качестве диагностического признака, маркирующего формирование почв в условиях выраженного на них давления сельскохозяйственной техники.

### Заключение

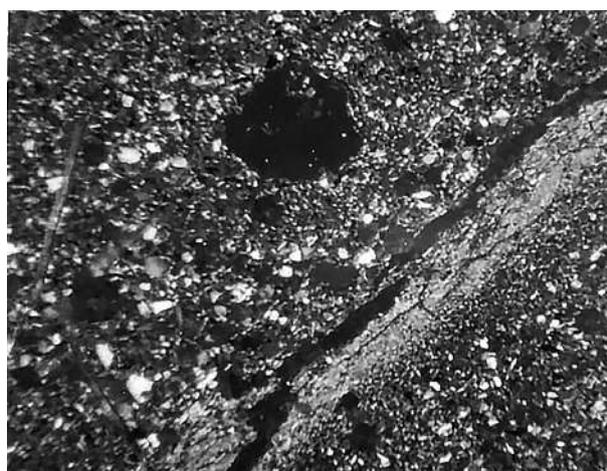
Изучение микростроения аллювиальных почв речных долин в пределах таёжно-лесной



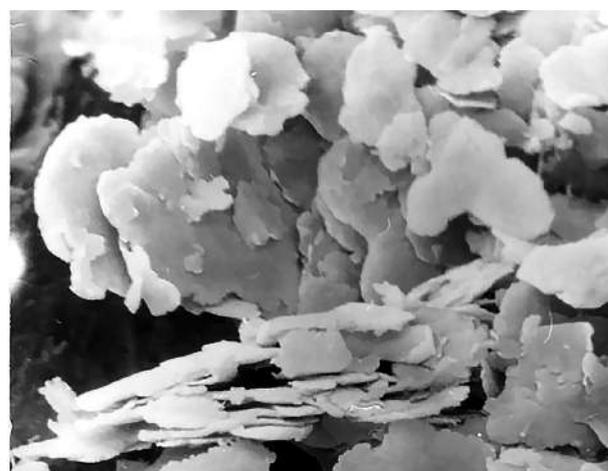
А / А



Б / В



В / С



Г / D

**Рис. 4.** Микроморфологическое строение пахотных луговых насыщенных почв долины р. Ока, формирующихся в условиях интенсивного антропогенного воздействия. Пахотный горизонт: А – интертекстурное микростроение; Б – потеря аморфного гумуса при распашке и орошении (увеличение 90, николи параллельные). Горизонт В ниже подплужной подошвы: В – деформированный глинистый натёк (увеличение 90, николи параллельные);

Г – глинистые домены с горизонтальным расположением чешуек (увеличение 10000, РЭМ)

**Fig. 4.** Micromorphological structure of arable meadow saturated soils of the Oka river valley, formed under intensive anthropogenic impact. Arable horizon: A – intertextural microstructure; B – loss of amorphous humus during plowing and irrigation (magnification 90, nicols parallel). Horizon B below the plow sole: C – deformed clay deposit (magnification 90, nicols parallel); D – clay domains with horizontal flakes (magnification 10000, SEM)

и степной зон позволило получить новые данные о формах органического вещества, различных видах почвенной структуры и пористости, провести раннюю диагностику процессов лессиважа, партлювации и оглеения.

Показано, что типоморфными новообразованиями, отражающими зональные черты аллювиальных луговых почв, являются разнообразные по форме и размерам новообразования, а также глинистые натёки и кутаны (плёнки). Для аллювиальных луговых кислых почв таёжно-лесной зоны в качестве диагностических признаков следует рассматривать

форму и распределение железо-марганцевых новообразований и характер глинистых натёков и кутан. В экологических условиях высокой поймы (свободный дренаж) в профиле почв формируются хорошо оформленные железистые новообразования (нодулы) и натёчные формы оптически ориентированных глин. В экологических условиях низкой поймы (затруднённый дренаж) железистые новообразования имеют преимущественно форму пятен и хлопьев, оптически ориентированные глины представлены кутанами (тонкими обесцвеченными плёнками). Разделение аллювиальных почв на почвы высокой и низкой поймы следу-

ет учитывать при диагностике, классификации и практическом использовании этих почв.

В аллювиальных луговых насыщенных почвах, формирующихся в речных долинах степной зоны, типоморфными новообразованиями, отражающими зональность почв, являются различные формы карбонатов и гипса.

В условиях интенсивного орошаемого земледелия в поймах рек происходит вымывание аморфного гумуса из пахотного горизонта и переориентация глинистых минералов в горизонтальное расположение в горизонтах, располагающихся ниже плужной подошвы.

*Работа выполнена в рамках государственного задания факультета почвоведения МГУ им. М. В. Ломоносова (№ 121041300098-7) и ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600023-8).*

## References

- Dobrovolskiy G.V., Balabko P.N., Stasjuk N.V., Bykova E.P. Alluvial soils of fluvial floodplains and deltas and their zonal differences // *Aridnye ekosistemy*. 2011. V. 17. No. 3 (48). P. 5–13 (in Russian).
- Dobrovolskiy G.V. Soils of river floodplains of the center of the Russian Plain. Moskva: Izd-vo MGU, 2005. 290 p. (in Russian).
- Shishkina N.G., Vostokova L.B., Balabko P.N., Lukyanova N.N. Soils of river valleys and floodplains of the forest zone of the Non-Black Earth Region // *Lesnoj vestnik*. 2001. No. 1. P. 108–114 (in Russian).
- Gerasimova M.I., Savitskaya N.V. Micromorphological interpretation of natural and anthropogenic evolution of soils in Bykovo lacustrine-alluvial section of the Moskva river floodplain // *Eurasian Soil Science*. 2020. V. 53. No. 7. P. 950–959. doi: 10.31857/S0032180X20070035
- Zharinova N.Y., Yamskikh G.Yu., Shpedt A.A. The diagnostics of the alluvial peat-gley soils of Krasnoyarsk forest-steppe // *Vestnik KrasGAU*. 2014. No. 11. P. 87–93 (in Russian).
- Balabko P.N., Sneg, A.A. Genesis, classification and zoning of floodplain soils of river valleys of the Siberian region // *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2007. V. 14. No. 5. P. 737–741 (in Russian).
- Lapteva E.M., Balabko P.N. Peculiarities of formation and use of floodplain soils of the Pechora River valley. Syktyvkar: Komi NC UrO RAN, 1999. 204 p. (in Russian).
- Balabko P.N., Avetov N.A., Gurova T.A., Oreshnikova N.V. About floodplain soils of Kaluga vicinity // *Plodородie*. 2004. No. 3 (18). P. 27–29 (in Russian).
- Balabko P.N., Sneg A.A., Lokalina T.V., Shechdrin V.N. Reclaimed floodplain soils of upper Oka river used in intensive farming // *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii*. 2016. No. 3 (23). P. 116–137 (in Russian).
- Prosyannikov D.E., Balabko P.N., Prosyannikov E.V., Chekin G.V. Modern condition ecosystems right-bank flood plain average Desna and prospect of its rational use // *Agrohimicheskij vestnik*. 2012. No. 5. P. 9–13 (in Russian).
- Vostokova L.B., Shishkina N.G., Balabko P.N. Soils of floodplain forests of Nechernozemye // *Lesnoj vestnik*. 2003. No. 5. P. 25–33 (in Russian).
- Balabko P.N. Micromorphological signs of zoning in alluvial meadow soils of the Ob and Tikhaya Sosna river valleys // *Morphology of soils: from macro- to submicrolevel: Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Moskva: Soil Institute named after V.V. Dokuchaev*, 2016. P. 290–293 (in Russian).
- Methodological Guide to Soil Micromorphology. Training guide / Ed. G.V. Dobrovolskiy. Moskva: MGU, 1983. 80 p. (in Russian).
- Parfenova E.I., Yarilova E.A. A guide to micromorphological studies in soil science. Moskva: Nauka, 1977, 198 p. (in Russian).
- Brewer R. Fabric and mineral analysis of soils. New York: Wiley, 1964. 470 p.
- Kubiena W. Micropedology. Ames, Iowa: Collegiate Press, 1938. 243 p.
- Kubiena W. Micromorphological features of soil geography. New Brunswick: Rutgers University Press, 1970. 254 p.
- Egorov V.V., Friedland V.M., Ivanova E.N., Rozov N.N., Nosin V.A., Frieve T.A. Classification and diagnostics of soils of the USSR. Moskva: Kolos, 1977. 224 p (in Russian).
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oycumena, 2004. 342 p. (in Russian).
- Grigoryan B.R., Kulagina V.I. Diagnostics and nomenclature of sandy alluvial soils in four classification systems on the example of soils of the Kuibyshev Reservoir islands // *Pochvovedenie*. 2014. No. 6. P. 677–684 (in Russian). doi: 10.7868/S0032180X14060045
- National soil atlas of the Russian Federation. Moskva: Astrel: AST, 2011. 632 p. (in Russian).
- Gerasimova M.I., Gubin S.V., Shoba S.A. Micromorphology of soils in natural zones. Pushchino: Pushchino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1992. 215 p. (in Russian).
- Rusanova G.V. Micromorphology of anthropogenic-altered soils (on the example of tundra and taiga soils of the Russian plain and the Northern Urals). Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. 158 p. (in Russian).
- Targulyan V.O. Soil formation and weathering in cold humid areas (on massive crystalline and sandy polymictic rocks). Moskva: Nauka, 1971. 268 p. (in Russian).
- Zaidelman F.R. Gleyzation process and its role in soil formation. Moskva: Publishing house Moscow. Univ., 1998. 300 p. (in Russian).
- Zaidelman F.R., Belichenko M.V., Nikiforova A.S. Changes in the chemical properties of floodplain soils under the influence of drainage, sprinkling and agricultural use // *Vestnik MGU. Seriya 17. Pochvovedenie*. 1999. P. 10–16 (in Russian).

## Разнообразие актинобактериальных сообществ в местах захоронения жидких отходов химического предприятия

© 2023. И. Г. Широких<sup>1,2</sup>, д. б. н., в. н. с., профессор,  
 Н. А. Боков<sup>2</sup>, аспирант, Е. В. Дабах<sup>1</sup>, к. б. н., с. н. с.,  
 Л. В. Кондакова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,  
 Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,  
<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,  
 e-mail: irgenal@mail.ru

На примере техносолей, сформировавшихся на территории бывшего хвостохранилища жидких отходов химического предприятия в долине реки Вятки, изучены состав и таксономическая структура филома Actinobacteria. Исследовано разнообразие актинобактерий в образцах почв, отобранных с трёх пространственно удалённых площадок мониторинга (СГ, СУ1 и СУ2), различающихся по комплексу физико-химических свойств и характеру растительного покрова. Результаты сопоставлены с фоном – аллювиальной почвой (ФП), отобранной на территории ГПЗ «Нургуш». Исследования проведены с использованием высокопроизводительного секвенирования по технологии Illumina и культуральным методом (посев). Культуральный метод выявил в составе актинобактериальных комплексов представителей родов *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Streptosporangium* и ряд олигоспоровых форм. Общая численность актиномицетов в образцах техносолей изменялась от  $2,4 \cdot 10^4$  до  $1,8 \cdot 10^5$  КОЕ/г, а в фоновой почве составила  $8,5 \cdot 10^3$  КОЕ/г. Семейства актиномицетов, установленные методом посева, были обнаружены и с помощью метода ампликонного секвенирования участка V4 гена 16S рРНК. Молекулярный метод вместе с тем позволил выявить в исследуемых образцах и ряд других таксонов, в том числе, не имеющих культивируемых представителей или пока неклассифицированных. С помощью ампликонного секвенирования было установлено, что представители филома *Actinobacteria* в образцах техногенных почв являются абсолютными доминантами по относительному обилию в общем бактериальном разнообразии. Доля актинобактерий в этих почвах колеблется от 33 до 41%, тогда как в фоновой почве составляет только 22%. *Actinobacteria* в образцах техносолей были представлены семействами *Micromonosporaceae*, *Micrococcaceae*, *Nocardioidaceae*, *Microbacteriaceae*, *Thermomonosporaceae*, *Pseudonocardiaceae*, *Actinosynnemataceae* и *Intrasporangiaceae* и др. Таксономический спектр актинобактерий в образце ФП был сходен с техносолями, но долевое соотношение таксонов при этом было иным. Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях почвенной актинобиоты в связи с изменениями экосистем, нарушенных хозяйственной деятельностью человека, а также представляют интерес для поиска и выделения природных штаммов актинобактерий в целях биотехнологии.

**Ключевые слова:** отходы химического производства, техносоли, актинобактерии, актиномицеты, разнообразие, таксономическая структура.

## Diversity of active bacterial communities in the disposal sites of liquid waste of a chemical enterprise

© 2023. I. G. Shirokikh<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0002-3319-2729, N. A. Bokov<sup>2</sup>, ORCID: 0000-0002-1000-1192,  
 E. V. Dabakh<sup>1</sup>, ORCID: 0000-0002-6088-4819, L. V. Kondakova<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0002-2190-686X,  
 T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0003-4919-0047

<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,  
 e-mail: irgenal@mail.ru

SU2), differing in the complex of physico-chemical properties and the nature of the vegetation cover, was studied. The results were compared with the background soil (BS) – alluvial soil selected on the territory of the Nurgush State Nature Reserve. The studies were carried out using high-performance sequencing using Illumina technology and the culture method (seeding). The culture method revealed representatives of the genera *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Streptosporangium* and a number of oligospore forms in the actinobacterial complexes. The total number of actinomycetes in the samples of technosols varied from  $2.4 \cdot 10^4$  to  $1.8 \cdot 10^5$  CFU/g, and in the background soil was  $8.5 \cdot 10^3$  CFU/g. Families of actinomycetes established by the seeding method were also detected using the amplicon sequencing of the V4 section of the 16S rRNA gene, but the molecular method made it possible to identify a number of other taxa in the studied samples, including those that do not have cultured representatives or are not yet classified. Using amplicon sequencing, it was found that representatives of the phylum Actinobacteria in samples of technogenically disturbed soils are absolute dominants in relative abundance in the total bacterial diversity. The proportion of actinobacteria in disturbed soils ranges from 33 to 41%, while in the background soil it is only 22%. Actinobacteria in the samples of technosols were represented by the families Micromonosporaceae, Micrococcaceae, Nocardioidaceae, Microbacteriaceae, Thermomonosporaceae, Pseudonocardiaceae, Actinosynnemataceae, and Intrasporangiaceae, etc. The taxonomic spectrum of actinobacteria in the BS sample was similar to technosols, but the proportion of taxa was different. The results obtained will be used in further studies of soil actinobiota in connection with changes in ecosystems disrupted by human economic activity, and are also of interest for the search and isolation of natural strains of actinobacteria for biotechnology purposes.

**Keywords:** chemical production waste, technosols, actinobacteria, actinomycetes, diversity, taxonomic structure.

Актинобактерии – грамположительные прокариоты с высоким содержанием в ДНК гуанина и цитозина (57–75%), составляют один из крупнейших бактериальных филумов – Actinobacteria. Многие из них реализуют миксальный образ жизни и характеризуются сложной морфологической дифференциацией (актиномицеты). Актинобактерии повсеместно распространены как в водных, так и в наземных экосистемах, обладают поразительно широкими метаболическими возможностями, которые обусловлены их гораздо большим, в сравнении с другими бактериями, геномом [1]. Метаболический потенциал актинобактерий широко используется в производстве антибиотиков, иммуномодуляторов, противоопухолевых соединений [2, 3]. Как продуценты ферментов актинобактерии находят применение в производстве моющих средств, текстильной, перерабатывающей, пищевой, целлюлозно-бумажной, сельскохозяйственной и фармацевтической промышленности [4].

Актинобактерии широко распространены в почвах, особенно в сухих, слабокислых, богатых органическим веществом. Они составляют значительную долю от общей микробной биомассы почвы [2] и участвуют в трансформации и минерализации органических остатков, разлагают труднодоступные другим бактериям полимеры, участвуют в биогеохимических циклах азота, углерода, фосфора и других элементов [5].

Вместе с тем известно, что микробное разнообразие ещё далеко не изучено, и подавляющее большинство прокариотов (90–99%), присутствующих в естественных средах обитания, всё ещё предстоит изолировать и/или научиться культивировать [6]. Остаются

неисследованными или слабо изученными не только природные среды, но и техногенные почвенные образования, формирующиеся в результате различных видов производственной деятельности, которые тоже могут считаться ценным ресурсом для выделения малоизученных микроорганизмов [7], включая актинобактерии, многие из которых представляют промышленный интерес в качестве потенциальных кандидатов для будущих биотехнологических применений [8, 9]. Развитие в последние годы молекулярно-генетических методов даёт возможность более успешно решать задачи экологической оценки микробного разнообразия [10, 11].

Отходы промышленного производства являются сегодня одним из самых мощных факторов, оказывающих негативное воздействие на природные экосистемы. В целях предотвращения загрязнения окружающей среды отходы изолируются путём засыпки мест их хранения различными по свойствам грунтами. Этот процесс является неотъемлемой частью технического этапа рекультивации. Биологический этап предусматривает перекрытие насыпных грунтов плодородным слоем земли с последующим посевом трав или посадкой саженцев древесных культур. Однако при использовании для засыпки рыхлых природных материалов довольно быстро начинается процесс самозаращения территории складирования отходов, происходит формирование почвенного покрова. Так, вблизи г. Кирово-Чепецка Кировской области, после ликвидации в 2012 г. хранилища жидких отходов химических предприятий путём засыпки котлована песком, глиной, а также нетоксичными отходами производства (гипсом и известью), образовалась площадка с

выраженным микрорельефом. Благодаря наличию семян и зачатков в насыпном материале, а также вследствие их приноса ветром с окрестных территорий, площадка уже через год начала зарастать сорной растительностью, характерной для окружающего ландшафта, начался процесс почвообразования [12]. К настоящему времени появляются признаки дифференциации профиля, формирующиеся почвы относятся к техносолям (Technosols по WRB).

Цель работы – сравнительная оценка разнообразия актинобактериальных сообществ культуральным и молекулярно-генетическим методами в техногенных почвах, формирующихся на месте захоронения жидких отходов химического предприятия.

### Объекты и методы

**Объекты исследования.** Образцы почв отбирали на территории бывшего хвостохранилища, расположенного в долине р. Вятки в зоне подтопления. До заполнения котлована твёрдым материалом – песком, глиной, гипсом с примесью извести – хранилище представляло собой водоём (площадь зеркала воды около 51 тыс. м<sup>2</sup>), в котором объём жидких отходов оценивался в 275 тыс. м<sup>3</sup>. С трёх площадок мониторинга СГ, СУ1 и СУ2, отражающих разнообразие формирующихся растительных ассоциаций на территории засыпанного хвостохранилища, из верхнего горизонта (0–10 см) отбирали по пять проб методом конверта и готовили методом квартования смешанный образец для каждой площадки. Для сравнения служил образец (фоновая почва – ФП), отобранный из верхнего горизонта слабокислой аллювиальной почвы ГПЗ «Нургуш», расположенного также в долине р. Вятки, но ниже по течению. Образцы различались по гранулометрическому составу: суглинок – СГ; супесь, подстилаемая карбонатным суглинком – СУ1; супесь – СУ2; содержанию органического углерода (1,6, 4,6 и 5,0% соответственно), показателям кислотности (7,7, 7,4 и 6,2 ед. рН<sub>соль</sub>), ионов азотной группы (до 260 мг/кг N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), тяжёлых металлов и характеру растительности (злаково-бобовая ассоциация *Agropyron repens* Beauv. – *Lathyrus pratensis* L.; злаковая ассоциация *Agropyron repens* Beauv.; плотная тростниковая ассоциация *Phragmites communis* Trin). Аллювиальная почва фонового участка под устойчивой ассоциацией *Tilia cordata* Mill. (*T. parvifolia* Ehrh.) – *Matteuccia struthiopteris* L. Tod. характеризовалась суглинистым механическим

составом, наиболее низким значением рН<sub>соль</sub> 5,6, средним содержанием органического вещества С – 3,2%

**Культуральный метод.** Численность и структуру комплексов актиномицетов определяли при посеве из разведений почвенных суспензий на среду с пропионатом натрия и казеин-глицериновый агар (КГА) [13]. Каждый объединённый образец при посеве характеризовали двумя индивидуальными навесками. Для ограничения роста немикелиальных бактерий использовали селективный приём: прогревание почвы при 70 °С в течение 4 час. Инкубация посевов происходила при 28 °С в течение двух недель, после чего проводили дифференцированный учёт выросших колоний по морфотипам и выделение клонов для дальнейшей работы. Выделенные культуры хранили в пробирках со скошенной овсяной средой при температуре 4 °С. Морфологические признаки исследовали при помощи светового микроскопа Leica DM 2500 (Carl Zeiss, Германия).

Принадлежность выделенных культур актиномицетов к роду *Streptomyces* определяли на основании характерных морфологических признаков: нефрагментированный мицелий, длинные цепочки спор – на воздушном и отсутствие спор – на субстратном мицелии. Актиномицеты, имеющие одиночные споры на субстратном мицелии, лишённые или со слабым развитием стерильного воздушного мицелия, с не фрагментированным мицелием предварительно идентифицировали как представителей рода *Micromonospora*. Культуры, принадлежащие к роду *Streptosporangium*, определяли по наличию ветвящегося, не фрагментированного субстратного мицелия, не несущего споры, и воздушных гиф с цепочками спор и спорангиями. Актиномицеты, образующие одиночные споры на воздушном мицелии, либо короткие цепочки более крупных, чем стрептомицетные, спор на ветках воздушного и/или субстратного мицелия объединяли в группу олигоспоровых актиномицетов [14]. Видовую идентификацию стрептомицетов проводили по [15] на основании морфологических (форма цепочек спор) и культуральных (окраска воздушного и субстратного мицелия, наличие растворимых и меланоидных пигментов на диагностических средах) признаков. На основании показателей долевого участия отдельных таксонов характеризовали родовую структуру комплексов на среде с пропионатом натрия, видовую структуру рода *Streptomyces* – на казеин-глицериновом агаре (КГА).

**Молекулярно-генетический метод.** Выделение из образцов тотальной почвенной ДНК и ампликонное секвенирование участка V4 гена 16S рРНК для выявления филогенетического разнообразия прокариот выполнены в Центре коллективного пользования «Геномные технологии и клеточная биология» ФГБНУ ВНИИСХМ (Санкт-Петербург, г. Пушкин). Очищенный препарат ДНК служил в качестве матрицы в реакции ПЦР с универсальными праймерами к варибельному участку V4 гена 16S рРНК F515 GTGCCAGCMGCCGCGGTAA и R806 GGACTACVSGGGTATCTAAT [16]. Секвенирование осуществляли на приборе Illumina MiSeq (Illumina, США), согласно рекомендациям производителя. Использовали метод парно-концевого чтения с генерацией не менее 20000 парных прочтений на образец.

Биоинформатическую обработку данных проводили с использованием пакета QIIME 2 [17]. Для удаления технических последовательностей в полученных сиквенсах использовали плагин q2-cutadapt. При помощи инструментов программы осуществляли проверку качества секвенирования и создание библиотеки сиквенсов. Для исправления ошибок использовали плагин DADA2 [18]. Классификацию репрезентативных последовательностей по таксонам проводили с восстановлением исходных флотипов (ASV, Amplicon sequence variant) и дальнейшей таксономической классификации полученных ASV. Использовали базу нуклеотидных последовательностей GreenGenes, версия 13\_8, адаптированную к праймерам F515/R806. Порог классификации составлял 99%. Для оценки таксономического разнообразия при помощи того же алгоритма QIIME 2 были рассчитаны индексы альфа-разнообразия, при расчёте которых проводили нормализацию выборки по образцу с наименьшей глубиной секвенирования (3000 последовательностей). Альфа-разнообразие характеризовали с помощью нескольких показателей: индексов Шеннона, Чао1 и Симпсона [19]. Сравнение списков для четырёх образцов проводили с построением диаграмм с помощью интерактивного инструмента InteractiVenn (<http://www.interactivenn.net/>) [20].

Статистическая обработка результатов выполнена с использованием пакетов программ Microsoft Excel и Statgraphics. В таблицах приведены средние значения из трёх повторений и их стандартные отклонения при  $P \geq 0,99$ .

## Результаты и обсуждение

Представители филума Actinobacteria были обнаружены во всех исследованных почвенных образцах. Общая численность актиномицетов, вырастающих при посеве на КГА, в образцах техносолой изменялась от  $2,4 \cdot 10^4$  до  $1,8 \cdot 10^5$  КОЕ/г, а в фоновой почве составила  $8,5 \cdot 10^3$  КОЕ/г (табл. 1).

Выше всего долевого участие актиномицетов в прокариотном комплексе было в образце СГ (15,5%), близким значением характеризовался образец СУ1 (14,2%). В прокариотном комплексе образцов фоновой почвы и техносолы СУ2, отличающихся более кислой реакцией почвенного раствора (рН соответственно 5,4 и 6,2) доля актиномицетов была значительно ниже и составила соответственно 1,1 и 5,5% от всего количества культивируемых бактерий. Актиномицетные комплексы, исследованные с помощью культурального метода, включали представителей родов *Streptomyces*, *Micromonospora*, *Streptosporangium* и ряд олигоспоровых форм. Комплексы техносолой в сравнении с ФП отличались более широким таксономическим разнообразием, включая представителей 3–4 родов и 8–9 цветковых секций и серий рода *Streptomyces*, в то время как в комплексе ФП отмечены представители трёх родов, а виды стрептомицетов отнесены всего к двум секциям и сериям – *Cinereus* *Achromogenes* и *Albus* *Albus*.

Относительная доля стрептомицетов в комплексах СГ (64,9%) и СУ2 (93,4%) многократно превосходила вклад других представителей мицелиальных прокариот, среди которых микромоноспоры (5,1–90,3%) выделялись более высоким относительным обилием, в сравнении с минорными компонентами, к числу которых в этих образцах были отнесены стрептоспорангии (1,6–8,6%) и олигоспоровые виды (0–3,7%). В образцах ФП (90,3%) и СУ1 (72,6%) по относительному обилию доминировали виды рода *Micromonospora*. Особенно низкой долей стрептомицетов, а также отсутствием олигоспоровых форм отличался комплекс фоновой почвы.

В целом, техносолы отличались от ФП более высокими показателями численности, долевого участия в прокариотном комплексе и таксономического разнообразия актиномицетов, вырастающих на питательных средах после обработки почвы селективным приёмом (прогрев почвы при 70 °С в течение четырёх часов). Среди образцов формирующихся почв наиболее благоприятными для актиномицетов

Таблица 1 / Table 1

Численность и структура комплексов актиномицетов в техносолях и фоновой почве по данным культурального метода / The number and structure of actinomycete complexes in technosols and background soil according to the cultural method

Показатель / Index	Почвенные образцы / Soil samples			
	СГ	СУ1	СУ2	ФП
Общая численность, тыс. КОЕ/г Total number, thousand CFU/g	177±42	24±5	55±19	8,5±2,1
Доля в прокариотном комплексе, % Share in the prokaryotic complex, %	15,5%	14,2%	5,5%	1,1%
Количество родов / Number of genera	4	3	4	3
Количество секций и серий рода <i>Streptomyces</i> / Number of sections and series of the genus <i>Streptomyces</i>	9	9	8	2
Относительное обилие в комплексе представителей родов, % Relative abundance of representatives of genera in the complex, %	64,9	22,0	93,4	1,1
<i>Streptomyces</i>				
<i>Micromonospora</i>	29,8	72,6	5,1	90,3
<i>Streptosporangium</i>	1,6	5,4	1,35	8,6
олигоспоровые формы oligosporic forms	3,7	0	0,15	0

условиями отличался образец СГ с максимальным значением рН 7,7 и относительно низким содержанием  $C_{орг}$  – 1,6%. Из загрязняющих веществ в данном образце обнаружен мышьяк в количестве, равном ОДК 10 мг/кг.

Актинобиота образца СУ2 отличалась от СГ на порядок меньшей численностью и втрое меньшей относительной долей в прокариотном комплексе, что может объясняться как более кислой реакцией среды рН 6,2, так и большей увлажнённостью данного локуса ввиду более низкого положения в рельефе местности. Известно, что актиномицеты обычно приурочены к сухим почвам с щелочной реакцией [5].

Актиномицетный комплекс СУ1, несмотря на самое высокое в исследованном ряду почв содержание загрязняющих веществ (Sr 397–1150 мг/кг (фон 118 мг/кг),  $NO_3^-$  – 260 мг/кг (ПДК 140 мг/кг), характеризовался достаточно высокой долей актиномицетов (14,2%), очевидно, обусловленной снижением общей численности прокариот под воздействием фактора загрязнения. При этом обращает на себя внимание нетипичная для зональных почв родовая структура актинобактериального комплекса – с соотношением стрептомицетов и микромоноспор, смещённым в пользу микромоноспор, и отсутствием редких олигоспоровых видов, чувствительных к условиям среды. Структурные особенности актиномицетных сообществ в почвах, сформированных в месте захоронения отходов химического производ-

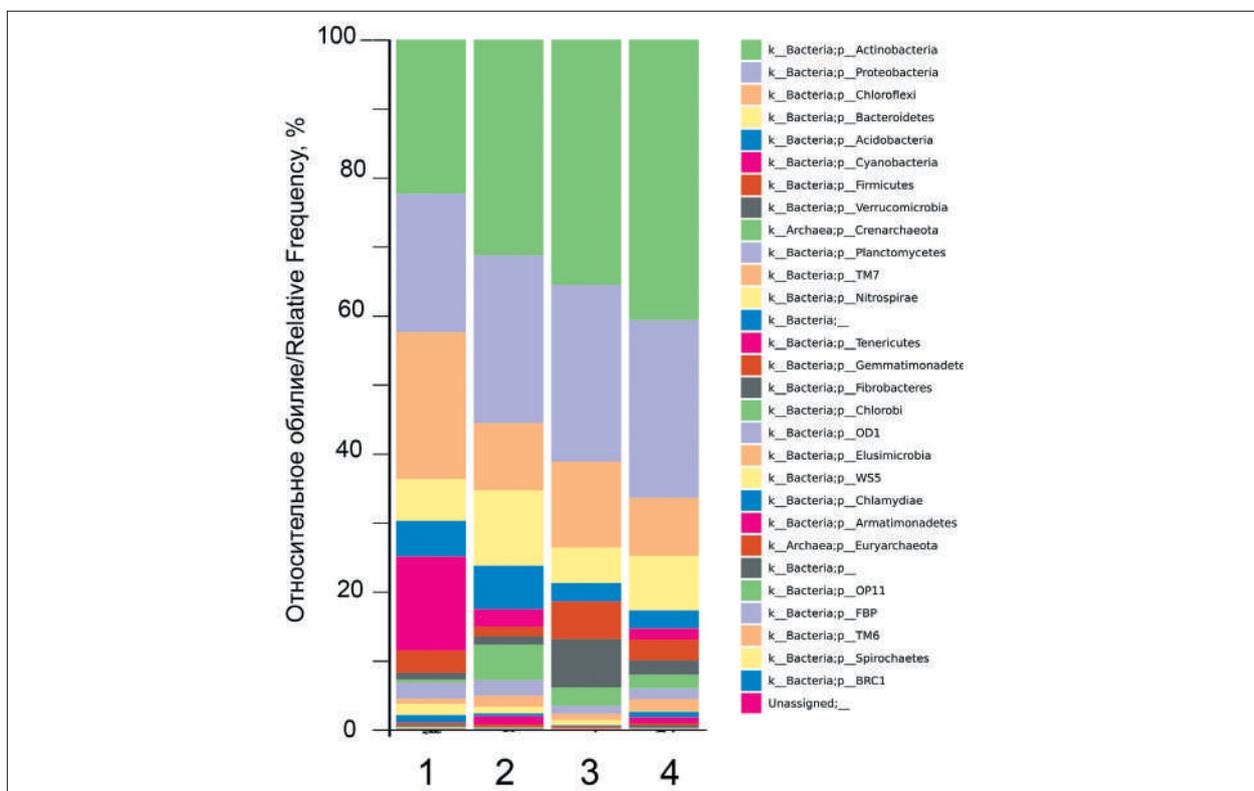
ства, таким образом, обусловлены комплексом физико-химических факторов и отражают специфику условий почвенной среды.

С помощью ампликонного секвенирования участка V4 гена 16S рРНК было установлено, что представители филума Actinobacteria в образцах техногенных почв являются абсолютными доминантами по относительному обилию ASV в общем бактериальном разнообразии. По молекулярным данным, их доля в техносолях изменялась от 33 до 41%, тогда как в фоновой почве составила только 22% (рис. 1, см. цв. вкладку III, табл. 2).

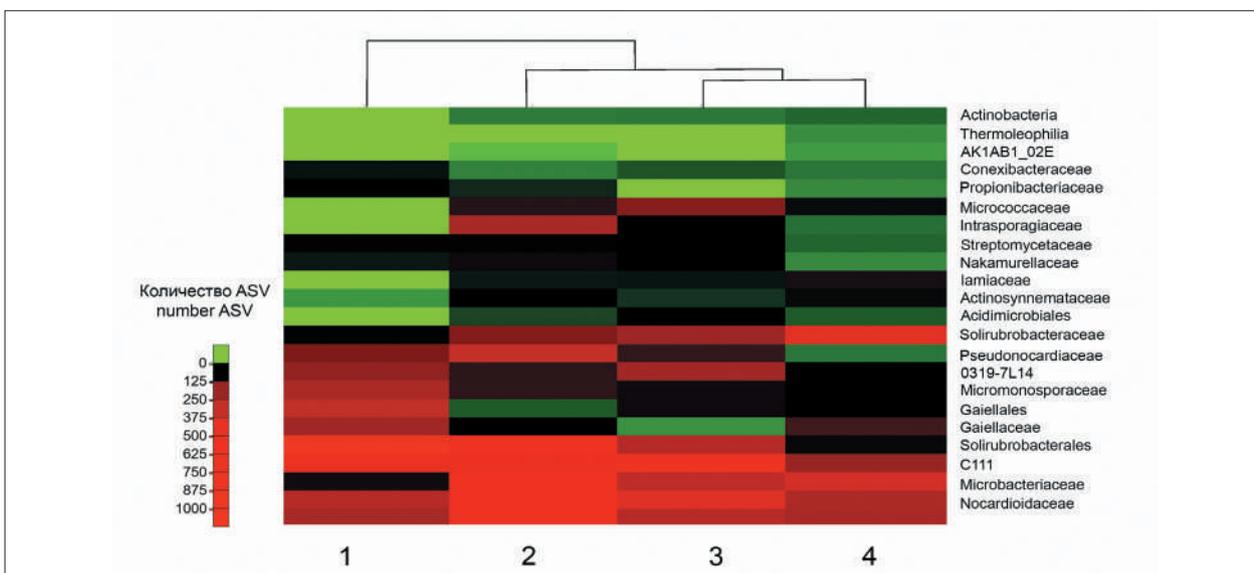
Эти результаты согласуются с данными, полученными культуральным методом (табл. 1). В составе филума во всех образцах обнаружены представители классов Thermoleophilia, Actinobacteria и порядка Acidimicrobiales. В образце ФП отнесенные к порядку Acidimicrobiales сиквенсы составили треть от всех актинобактерий и были представлены некультивируемыми формами.

Класс актинобактерий на 97–100% представлен порядком Actinomycetales как в техносолях, так и в фоновой почве. Чтобы оценить различия в составе актинобактериального сообщества, последовательно были таксономически классифицированы, где это было возможно, до уровня семейства. На тепловой карте, при кластеризации полученных данных автоматизированным алгоритмом, актинобактериальное сообщество образца ФП чётко

**И. Г. Широких, Н. А. Боков, Е. В. Дабах, Л. В. Кондакова**  
**«Разнообразие актинобактериальных сообществ**  
**в местах захоронения жидких отходов**  
**химического предприятия». С. 174.**



**Рис. 1.** Таксономическая структура микробиомов в техносолях и фоновой почве на уровне прокариотных филумов в образцах: 1– ФП, 2 – СГ, 3 – СУ1, 4 – СУ2  
**Fig. 1.** Taxonomic structure of microbiomes in technosols and background soil at the level of prokaryotic phyla in samples: 1– BS, 2 – SG, 3 – SU1, 4 – SU2



**Рис. 2.** Тепловая карта, отражающая количество ASV, соотнесённых с различными семействами класса Actinobacteria в образцах: 1– ФП, 2 – СГ, 3 – СУ1, 4 – СУ2  
**Fig. 2.** Heat map reflecting the number of Amplicon Sequence Variants (ASV) associated with different families of the Actinobacteria class in samples: 1– BS, 2 – SG, 3 – SU1, 4 – SU2

И. Г. Широких, Н. А. Боков, Е. В. Дабах, Л. В. Кондакова  
 «Разнообразие актинобактериальных сообществ  
 в местах захоронения жидких отходов  
 химического предприятия». С. 174.

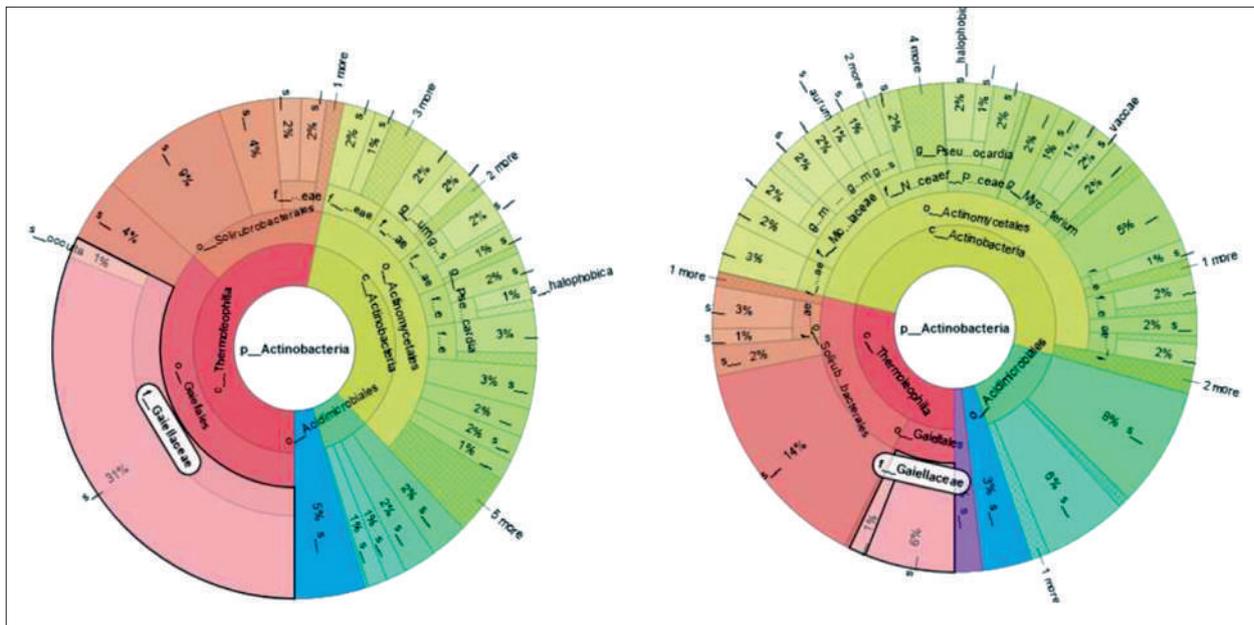


Рис. 3. Вклады в таксономическую структуру представителей филума Actinobacteria семейства Gaiellaceae в образцах ФП (слева) и СУ1 (справа)  
 Fig. 3. Contributions to the taxonomic structure of representatives of the phylum Actinobacteria of the Gaiellaceae family in the BS (left) and SU1 (on right) samples

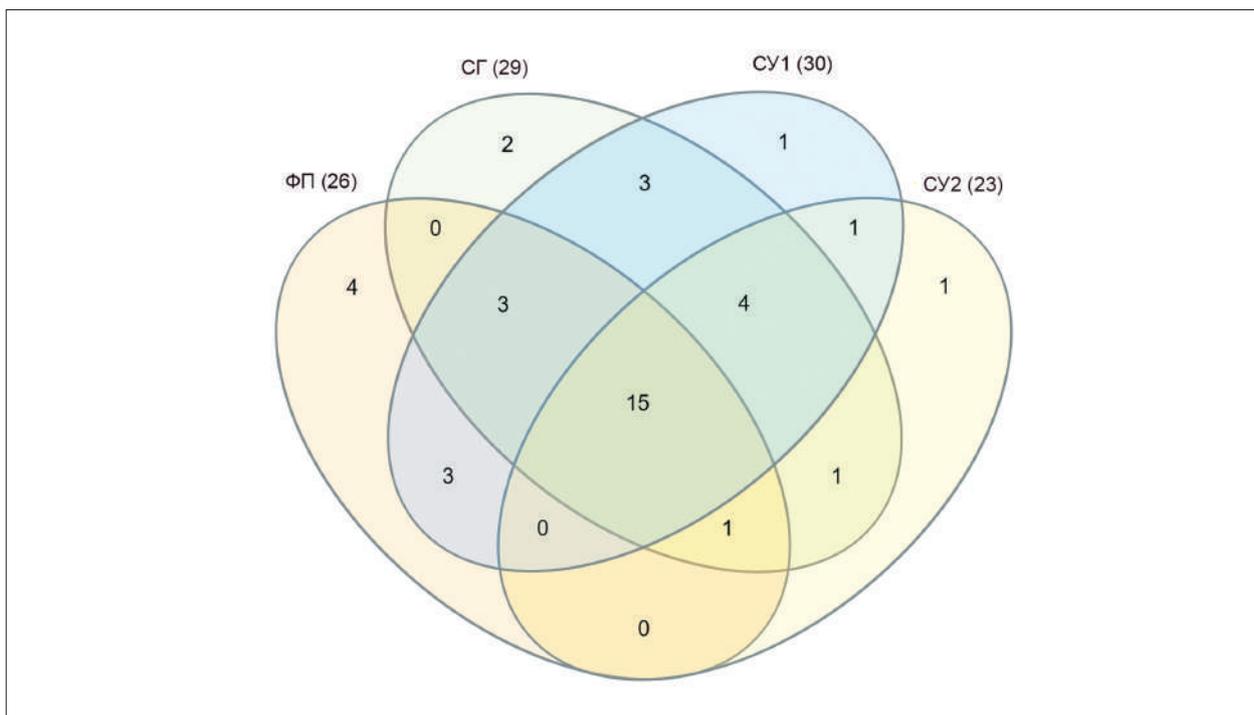


Рис. 4. Диаграмма Венна, отображающая число общих и уникальных семейств в образцах техносолей (СГ, СУ1 и СУ2) и природной фоновой почвы (ФП)  
 Fig. 4. Venn diagram showing the number of common and unique families in the technosol samples (СГ, СУ1 and СУ2) and natural background soils (ФП)

отделено от трёх других образцов техносолей, объединённых в общий кластер (рис. 2, см. цв. вкладку III).

В зависимости от образца в таксономической структуре класса выявлено от 23 до 30 семейств (табл. 2). Наибольшее количество полученных последовательностей соотнесено с семействами *Micromonosporaceae*, *Micrococcaceae*, *Nocardiodaceae*, *Microbacteriaceae*, *Thermomonosporaceae*, *Pseudonocardia*ceae, *Actinosynnemataceae* и *Intrasporangiaceae*. В образцах техногенных почв, в отличие от ФП, не обнаружены ASV, принадлежащие актиномицетам из семейств *Frankiaceae*, *Thermomonosporaceae*, *Cellulomonadaceae* и AKIW874. В то же время, в образце ФП отсутствовали представители семейств *Nakamurellaceae*, *Intrasporangiaceae*, *Geodermatophilaceae*, *Actinosynnemataceae*, *Rubrobacteraceae*, выявленные только в техносолях. Кроме того, относительная доля сиквенсов, соотнесённых с *Microbacteriaceae* (20–26%) и *Nocardiodaceae* (15–26%) была значительно выше в образцах техногенных почв, а доля *Micromonosporaceae* (2–8%), напротив, ниже, чем в ФП (17%).

Установленные методом посева семейства актиномицетов *Streptomycetaceae*, *Micromonosporaceae*, *Streptosporangiaceae* были обнаружены в образцах исследуемых

почв и с помощью метода ампликонного секвенирования. Количество ASV, отнесённых к этим таксонам в каждом образце (табл. 2), пропорционально относительному обилию таксона в актиномицетных комплексах, рассчитанному по данным посева (табл. 1).

Молекулярно-генетический метод позволил выявить в исследуемых образцах и ряд других таксонов, в том числе, не имеющих культивируемых представителей или неклассифицированных. Так, среди ASV, отнесённых к порядку *Acidimicrobiales*, в значительном количестве (от 158 в ФП до 699 в СГ) выявлены С111. Существенная доля сиквенсов была отнесена к семейству *Gaiellaceae* (класс *Thermoleophilia*) с одним ныне известным родом *Gaiella*. Особо многочисленными (11% от всего разнообразия прокариот) *Gaiellaceae* были в почве фонового участка, снижая свою представленность в 2,0–2,5 раза в техносолях. По данным секвенирования высокой численностью отличались также ASV, соотнесённые с родами *Agromyces*, *Nocardioides*, *Salinibacterium*, *Pseudonocardia*, которые не были выявлены в образцах культуральным методом.

Доля представителей семейства *Streptomycetaceae*, согласно молекулярным данным, не превышала в образцах 1,2–2,0% (табл. 2). Столь

Таблица 2 / Table 2

Состав и филогенетическое разнообразие актинобактерий в техносолях и фоновой почве по данным молекулярного метода / Composition and phylogenetic diversity of actinobacteria in technosols and background soil according to the molecular method

Показатель / Index	Почвенные образцы / Soil samples			
	СГ	СУ1	СУ2	ФП
Общее количество ASV, классифицированных как Actinobacteria / Total number of ASVs classified as Actinobacteria	6374	5760	4660	3001
Доля ASV актинобактерий от общего бактериального разнообразия, % Share of ASV actinobacteria from total bacterial diversity, %	37	41	33	22
Количество семейств Actinobacteria Number of Actinobacteria families	29	30	23	24
Количество ASV, отнесённых к семействам / Number of ASVs assigned to families				
	84	85	98	38
	42	154	96	380
	<i>Streptomycetaceae</i> <i>Micromonosporaceae</i> <i>Streptosporangiaceae</i>	0	41	0
Филогенетическое разнообразие / Phylogenetic diversity				
Индекс Шеннона / Shannon index	2,847	3,007	2,687	2,636
Индекс Чао1 / Chao1 Index	29	30	23	26
Индекс Симпсона / Simpson index	0,0759	0,0643	0,0880	0,1322

низкие результаты по сравнению с данными культурального метода можно объяснить методическими особенностями исследования данной группы микроорганизмов. Из литературы известно, что использование универсальных праймеров в метагеномных исследованиях часто не позволяет выявлять полное филогенетическое разнообразие представителей семейства Streptomycetaceae, поскольку они (праймеры) проявляют недостаточное сродство к ДНК с высоким содержанием гуанина и цитозина, что типично для стрептомицетов [21, 22].

Анализ филогенетического разнообразия актинобактерий в исследуемых образцах показал, что в техносолях, за исключением образца СУ2, количество выявленных таксонов выше по сравнению с природной аллювиальной почвой ФП (табл. 2). Вместе с тем, в фоновой почве величина индекса Чао 1, оценивающего максимально возможное видовое богатство, выше – 26, чем количество выявленных таксонов – 24. Судя по соотношению этих показателей, в результате ампликонного секвенирования удалось выявить более чем 90% таксономического богатства актинобиоты природной почвы, тогда как в техносолях сопоставление этих величин указывает на более полное выявление таксономического богатства и филогенетического разнообразия молекулярным методом.

Индекс Шеннона, отражающий не только количество таксонов, но и их относительное обилие в сообществе, имел, как и индекс Чао1 наибольшее значение в образце СУ1, а индекс Симпсона, который служит также мерой доминирования, поскольку его величина полностью определяется долей 1–2 наиболее многочисленных видов [23], напротив, характеризовался минимальным значением среди исследованных почв. Соответственно в образце ФП индекс Шеннона был минимальным, а Симпсона – максимальным, что хорошо согласуется с выше приведёнными данными о превалировании среди актинобактерий в аллювиальной почве, в отличие от техносолей, представителей семейства Gaiellaceae (рис. 3, см. цв. вкладку IV).

Выявление общих и уникальных актинобактериальных таксонов в исследуемых образцах проводили путём построения диаграмм Венна. Проведённый анализ показал, что количество семейств в данных почвах составило 108 и большинство из них относятся к общим, т. е. представляют собой «коровый» компонент актинобиоты (рис. 4, см. цв. вкладку IV).

Общими для всех микробиомов являлись актинобактерии родов *Microbacterium*,

*Salinibacterium*, *Agromyces*, *Pseudonocardia*, *Nocardioides*, *Streptomyces*, *Mycobacterium*, некласифицированные представители семейств Conexibacteraceae, Solirubrobacteraceae, Micromonosporaceae, Gaiellaceae и порядка Acidimicrobiales.

Наибольшим количеством (21) общих с фоновой почвой таксонов характеризовался образец СУ1, минимальным (16) – СУ2. Наиболее близки между собой по составу актинобактерий были техносоли СГ и СУ1, включающие представителей 25 общих семейств. Акцессорный компонент в исследованных образцах включал ограниченное количество таксонов: от 4-х в образце ФП до 2-х в СГ и 1-го в СУ1 и СУ2. Таким образом, актинобиота всех исследованных почв характеризовалась высокой степенью сходства и включала лишь единичные уникальные таксоны.

### Заключение

Сравнительные исследования актинобиоты почв (техносолей), сформированных в долине реки Вятки в процессе самозарастания территории бывшего хвостохранилища жидких отходов химического предприятия, были проведены с использованием двух методов – традиционного культурального (посев) и высокопроизводительного секвенирования по технологии Illumina. Это позволило охарактеризовать численность актинобиоты, таксономический состав и структуру, а также выявить характерные особенности, отличающие техносоли от природной аллювиальной почвы (фон).

Культуральным методом в составе актинобактериальных комплексов выявлены представители родов *Streptomyces* (сем. Streptomycetaceae), *Micromonospora* (сем. Micromonosporaceae), *Streptosporangium* (сем. Streptosporangiaceae) и ряд олигоспоровых форм, принадлежащих порядку Actinomycetales. Все семейства, установленные методом посева, были обнаружены и с помощью метода ампликонного секвенирования участка V4 гена 16S рРНК, но при этом в исследуемых образцах удалось выявить и ряд других таксонов, в том числе, пока не идентифицированных и/или не имеющих культивируемых представителей. Показано, что представители филума Actinobacteria в прокариотных сообществах образцов техногенных почв являются абсолютными доминантами по относительному обилию (от 33 до 41%). В различных образцах техносолей обнаружены

ASV, принадлежащие от 23 до 30 семействам в зависимости от физико-химических свойств почвы и характера растительности. Наиболее представительными в техногенных почвах были семейства *Micromonosporaceae*, *Micrococcaceae*, *Nocardioideae*, *Microbacteriaceae*, *Thermomonosporaceae*, *Pseudonocardiaceae*, *Actinosynnemataceae* и *Intrasporangiaceae*. В образце фоновой почвы актинобактерии по своему таксономическому разнообразию были сходны с техносольями, но долевое соотношение между таксонами отличалось.

В целом, полученные двумя разными методами данные об актинобиоте почв, формирующихся на территории засыпанного хранилища жидких отходов химических предприятий, хорошо соответствуют друг другу, дополняют и расширяют существующие представления о распространении мицелиальных прокариот в природных и трансформированных хозяйственной деятельностью экосистемах, а также представляют интерес для поиска и выделения природных штаммов актинобактерий в целях биотехнологии.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» (государственная регистрация в ЕГИСУ № 122040100032-5).*

## Литература

1. Nett M., Ikeda H., Moore B.S. Genomic basis for natural product biosynthetic diversity in the actinomycetes // *Nat. Prod. Rep.* 2009. V. 9. P. 1362–1384.
2. Ait Barka E., Vatsa P., Sanchez L., Gaveau-Vaillant N., Jacquard C., Klenk H.P., Clément C., Ouhdouch Y., Van Wezel G.P. Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2016. V. 80. No. 1. P. 1–43.
3. Salwan R., Sharma V. Molecular and biotechnological aspects of secondary metabolites in actinobacteria // *Microbiological research.* 2020. V. 231. Article No. 126374.
4. Salwan R., Sharma V. The role of actinobacteria in the production of industrial enzymes // *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* / Eds. B.P. Singh, V.K. Gupta, A.K. Passari. Elsevier, 2018. P. 165–177.
5. Goodfellow M., Williams S.T. Ecology of actinomycetes // *Annu. Rev. Microbiol.* 1983. V. 37. P. 189–216.
6. Bertola M., Ferrarini A., Visioli G. Improvement of soil microbial diversity through sustainable agricultural practices and its evaluation by-omics approaches: A per-

spective for the environment, food quality and human safety // *Microorganisms.* 2021. V. 9. No. 7. Article No. 1400.

7. Scholier T., Lavrinienko A., Brila I., Tukalenko E., Hindström R., Vasylenko A., Cayol C., Ecke F., Singh N.J., Forsman J.T., Tolvanen A., Matala J., Huitu O., Kallio E.R., Koskela E., Mappes T., Watts P.C. Urban forest soils harbour distinct and more diverse communities of bacteria and fungi compared to less disturbed forest soils // *Molecular Ecology.* 2023. V. 32. No. 2. P. 504–517.

8. Wink J., Mohammadipanah F., Kazemi Shariat Panahi H. Practical aspects of working with actinobacteria // *Biology and Biotechnology of Actinobacteria* / Eds. J. Wink, F. Mohammadipanah, J. Hamedi. Springer, Cham, 2017. P. 329–376.

9. Nalini M.S., Prakash H.S. Actinobacteria: Diversity, plant interactions and biotechnology applications // *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture* / Eds. A. Yadav, J. Singh, A. Rastegari, N. Yadav. Springer, Cham, 2020. P. 199–244.

10. Fierer N., Lefter J.W., Adams B.J., Nielsen U.N., Bates S.T., Lauber C.L., Owens S., Gilbert J.A., Wall D.H., Caporaso G.J. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012. V. 109. No. 52. P. 21390–21395.

11. Caicedo-Montoya C., Gómez-Román M.P., Vázquez-Hernández M., Mora-Rincón R.A., Rodríguez-Luna S.D., Rodríguez-Sanoja R., Sanchez S. Evolutionary genomics and biosynthetic potential of novel environmental Actinobacteria // *Applied Microbiology and Biotechnology.* 2021. V. 105. No. 23. P. 8805–8822.

12. Кондакова Л.В., Дабах Е.В., Кислицына А.П. Формирование биоценоза на техногенных отходах // *Теоретическая и прикладная экология.* 2020. № 4. С. 129–135.

13. Нетрусов А.И., Егорова М.А., Захарчук Л.М. Практикум по микробиологии / Под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.

14. *Bergey's manual of systematic bacteriology: V. 5: The Actinobacteria* // *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* / Eds. M. Goodfellow, P. Kämpfer, H.-J. Busse, M.E. Trujillo, K. Suzuki, L. Wolfgang, W.B. Whitman. New York: Springer, 2012. 2031 p.

15. Гаузе Г.Ф., Преображенская Т.П., Свешникова М.А., Терехова Л.П., Максимова Т.С. Определитель актиномицетов. Роды *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. М.: Наука, 1983. 248 с.

16. Bates S.T., Berg-Lyons D., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil // *The ISME journal.* 2011. V. 5. No. 5. P. 908–917.

17. Bolyen E., Rideout J.R., Dillon M.R., Bokulich N.A., Abnet C.C., Al-Ghalith G.A., Alexander H., Alm E.J., Arumugam M., Asnicar F., Bai Y., Bisanz J.E., Bittinger K., Brejnrod A., Brislawn C.J., Brown C.T., Callahan B.J., Caraballo-Rodríguez A.M., Chase J., Cope E.K., Da Silva R.,

Diener C., Dorrestein P.C., Douglas G.M., Durall D.M., Duvallet C., Edwardson C.F., Ernst M., Estaki M., Fouquier J., Gauglitz J.M., Gibbons S.M., Gibson D.L., Gonzalez A., Gorlick K., Guo J., Hillmann B., Holmes S., Holste H., Huttenhower C., Huttley G.A., Janssen S., Jarmusch A.K., Jiang L., Kaehler B.D., Kang K.B., Keefe C.R., Keim P., Kelley S.T., Knights D., Koester I., Kosciolk T., Kreps J., Langille M.G.I., Lee J., Ley R., Liu Y.X., Loftfield E., Lozupone C., Maher M., Marotz C., Martin B.D., McDonald D., McIver L.J., Melnik A.V., Metcalf J.L., Morgan S.C., Morton J.T., Naimey A.T., Navas-Molina J.A., Nothias L.F., Orchanian S.B., Pearson T., Peoples S.L., Petras D., Preuss M.L., Pruesse E., Rasmussen L.B., Rivers A., Robeson M.S., Rosenthal P., Segata N., Shaffer M., Shiffer A., Sinha R., Song S.J., Spear J.R., Swafford A.D., Thompson L.R., Torres P.J., Trinh P., Tripathi A., Turnbaugh P.J., Ul-Hasan S., van der Hooft J.J.J., Vargas F., Vázquez-Baeza Y., Vogtmann E., von Hippel M., Walters W., Wan Y., Wang M., Warren J., Weber K.C., Williamson C.H.D., Willis A.D., Xu Z.Z., Zaneveld J.R., Zhang Y., Zhu Q., Knight R., Caporaso J.G. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 // *Nature Biotechnology*. 2019. V. 37. P. 852–857.

18. Callahan B.J., McMurdie P.J., Rosen M.J., Han A.W., Johnson A.J.A., Holmes S.P. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data // *Nature methods*. 2016. V. 13. No. 7. P. 581–583.

19. Мэгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М: Мир, 1992. 181 с.

20. Heberle H., Meirelles G.V., da Silva F.R., Telles G.P., Minghim R. InteractiVenn: a web-based tool for the analysis of sets through Venn diagrams // *BMC bioinformatics*. 2015. V. 16. P. 1–7.

21. Кузнецова А.И., Иванова Е.А., Самылина О.С., Курбанова Ф.Г., Груздев Д.С., Канапацкий Т.А., Пименов Н.В. Прокариотные сообщества засоленных почв Приэльтонья в почвенной катене вдоль реки Хары // *Микробиология*. 2020. Т. 89. № 6. С. 658–674.

22. Schwientek P., Szczepanowski R., Ruckert C., Stoye J., Puhler A. Sequencing of high G+C microbial genomes using the ultrafast pyrosequencing technology // *J. Biotechnology*. 2011. V. 155. No. 1. P. 68–77.

23. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения // *Количественные методы экологии и гидробиологии (сборник научных трудов, посвященный памяти А.И. Баканова)*. Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. С. 91–129.

## References

1. Nett M., Ikeda H., Moore B.S. Genomic basis for natural product biosynthetic diversity in the actinomycetes // *Nat. Prod. Rep.* 2009. V. 9. P. 1362–1384. doi: 10.1039/b817069j

2. Ait Barka E., Vatsa P., Sanchez L., Gaveau-Vaillant N., Jacquard C., Klenk H.P., Clément C., Ouhdouch Y., Van

Wezel G.P. Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 2016. V. 80. No. 1. P. 1–43. doi: 10.1128/mmbr.00019-15

3. Salwan R., Sharma V. Molecular and biotechnological aspects of secondary metabolites in actinobacteria // *Microbiological research*. 2020. V. 231. Article No. 126374. doi: 10.1016/j.micres.2019.126374

4. Salwan R., Sharma V. The role of actinobacteria in the production of industrial enzymes // *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering* / Eds. B.P. Singh, V.K. Gupta, A.K. Passari. Elsevier, 2018. P. 165–177. doi: 10.1016/B978-0-444-63994-3.00011-4

5. Goodfellow M., Williams S.T. Ecology of actinomycetes // *Annu. Rev. Microbiol.* 1983. V. 37. P. 189–216. doi: 10.1146/annurev.mi.37.100183.001201

6. Bertola M., Ferrarini A., Visioli G. Improvement of soil microbial diversity through sustainable agricultural practices and its evaluation by-omics approaches: A perspective for the environment, food quality and human safety // *Microorganisms*. 2021. V. 9. No. 7. Article No. 1400. doi: 10.3390/microorganisms9071400

7. Scholier T., Lavrinienko A., Brila I., Tukalenko E., Hindström R., Vasylenko A., Cayol C., Ecke F., Singh N.J., Forsman J.T., Tolvanen A., Matala J., Huitu O., Kallio E.R., Koskela E., Mappes T., Watts P.C. Urban forest soils harbour distinct and more diverse communities of bacteria and fungi compared to less disturbed forest soils // *Molecular Ecology*. 2023. V. 32. No. 2. P. 504–517. doi: 10.1111/mec.16754

8. Wink J., Mohammadipanah F., Kazemi Shariat Pannahi H. Practical aspects of working with actinobacteria // *Biology and Biotechnology of Actinobacteria* / Eds. J. Wink, F. Mohammadipanah, J. Hamedi. Springer, Cham, 2017. P. 329–376. doi: 10.1007/978-3-319-60339-1\_11

9. Nalini M.S., Prakash H.S. Actinobacteria: diversity, plant interactions and biotechnology applications // *Plant Microbiomes for Sustainable Agriculture* / Eds. A. Yadav, J. Singh, A. Rastegari, N. Yadav. Springer, Cham, 2020. P. 199–244. doi: 10.1007/978-3-030-38453-1\_7

10. Fierer N., Leff J.W., Adams B.J., Nielsen U.N., Bates S.T., Lauber C.L., Owens S., Gilbert J.A., Wall D.H., Caporaso G.J. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012. V. 109. No. 52. P. 21390–21395. doi: 10.1073/pnas.1215210110

11. Caicedo-Montoya C., Gómez-Román M.P., Vázquez-Hernández M., Mora-Rincón R.A., Rodríguez-Luna S.D., Rodríguez-Sanoja R., Sanchez S. Evolutionary genomics and biosynthetic potential of novel environmental Actinobacteria // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2021. V. 105. No. 23. P. 8805–8822. doi: 10.1007/s00253-021-11659-3

12. Kondakova L.V., Dabakh E.V., Kislitsyna A.P. Formation of biocenosis on technogenic waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 129–135 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-129-135

13. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M. Workshop on Microbiology / Ed. A.I. Netrusov. Moskva: Akademiya, 2005. 608 p. (in Russian).
14. Bergey's manual of systematic bacteriology: V. 5: The Actinobacteria // Bergey's Manual of Systematic Bacteriology / Eds. M. Goodfellow, P. Kämpfer, H.-J. Busse, M.E. Trujillo, K. Suzuki, L. Wolfgang, W.B. Whitman. New York: Springer, 2012. 2031 p. doi: 10.1007/978-0-387-68233-4
15. Gauze G.F., Preobrazhenskaya T.P., Sveshnikova M.A., Terekhova L.P., Maksimova T.S. Key to Actinomycetes. Genera *Streptomyces*, *Streptoverticillium*, *Chainia*. Moskva: Nauka, 1983. 248 p. (in Russian).
16. Bates S.T., Berg-Lyons D., Caporaso J.G., Walters W.A., Knight R., Fierer N. Examining the global distribution of dominant archaeal populations in soil // The ISME journal. 2011. V. 5. No. 5. P. 908–917. doi: 10.1038/ismej.2010.171
17. Bolyen E., Rideout J.R., Dillon M.R., Bokulich N.A., Abnet C.C., Al-Ghalith G.A., Alexander H., Alm E.J., Arumugam M., Asnicar F., Bai Y., Bisanz J.E., Bittinger K., Brejnrod A., Brislawn C.J., Brown C.T., Callahan B.J., Caraballo-Rodríguez A.M., Chase J., Cope E.K., Da Silva R., Diener C., Dorrestein P.C., Douglas G.M., Durall D.M., Duvallet C., Edwardson C.F., Ernst M., Estaki M., Fouquier J., Gauglitz J.M., Gibbons S.M., Gibson D.L., Gonzalez A., Gorlick K., Guo J., Hillmann B., Holmes S., Holste H., Huttenhower C., Huttley G.A., Janssen S., Jarmusch A.K., Jiang L., Kaehler B.D., Kang K.B., Keefe C.R., Keim P., Kelley S.T., Knights D., Koester I., Kosciulek T., Kreps J., Langille M.G.I., Lee J., Ley R., Liu Y.X., Loftfield E., Lozupone C., Maher M., Marotz C., Martin B.D., McDonald D., McIver L.J., Melnik A.V., Metcalf J.L., Morgan S.C., Morton J.T., Naimey A.T., Navas-Molina J.A., Nothias L.F., Orchanian S.B., Pearson T., Peoples S.L., Petras D., Preuss M.L., Pruesse E., Rasmussen L.B., Rivers A., Robeson M.S., Rosenthal P., Segata N., Shaffer M., Shiffer A., Sinha R., Song S.J., Spear J.R., Swafford A.D., Thompson L.R., Torres P.J., Trinh P., Tripathi A., Turnbaugh P.J., Ul-Hasan S., van der Hooft J.J.J., Vargas F., Vázquez-Baeza Y., Vogtmann E., von Hippel M., Walters W., Wan Y., Wang M., Warren J., Weber K.C., Williamson C.H.D., Willis A.D., Xu Z.Z., Zaneveld J.R., Zhang Y., Zhu Q., Knight R., Caporaso J.G. Reproducible, interactive, scalable and extensible microbiome data science using QIIME 2 // Nature Biotechnology. 2019. V. 37. P. 852–857. doi: 10.1038/s41587-019-0209-9
18. Callahan B.J., McMurdie P.J., Rosen M.J., Han A.W., Johnson A.J.A., Holmes S.P. DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data // Nature methods. 2016. V. 13. No. 7. P. 581–583. doi: 10.1038/nmeth.3869
19. Megarran E. Ecological diversity and its measurement. Moskva: Mir, 1992. 181 p. (in Russian).
20. Heberle H., Meirelles G.V., da Silva F.R., Telles G.P., Minghim R. InteractiVenn: a web-based tool for the analysis of sets through Venn diagrams // BMC bioinformatics. 2015. V. 16. P. 1–7. doi: 10.1186/s12859-015-0611-3
21. Kuznetsova A.I., Ivanova E.A., Samylina O.S., Kurbanova F.G., Gruzdev D.S., Kanapatskiy T.A., Pimenov N.V. Prokaryotic communities of saline soils of the Elton region in the soil catena along the Khara River // Mikrobiologiya. 2020. V. 89. No. 6. P. 658–674. doi: 10.31857/S0026365620060117
22. Schwientek P., Szczepanowski R., Ruckert C., Stoye J., Puhler A. Sequencing of high G+C microbial genomes using the ultrafast pyrosequencing technology // J. Biotechnology. 2011. V. 155. No. 1. P. 68–77. doi: 10.1016/j.jbiotec.2011.04.010.
23. Shitikov V.K., Rozenberg G.S. Biodiversity assessment: an attempt at formal generalization // Quantitative methods of ecology and hydrobiology (collection of scientific papers dedicated to the memory of A.I. Bakanov). Tolyatti: SamNTs RAN, 2005. P. 91–129 (in Russian).

## Трансформация почвенной альгоцианофлоры под влиянием фосфоритов Верхнекамских бедных

© 2023. Л. В. Кондакова<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор, с. н. с.,  
Н. В. Сырчина<sup>2</sup>, к. х. н., доцент, с. н. с.,  
Т. Я. Ашихмина<sup>1,2</sup>, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,  
И. А. Кондакова<sup>2</sup>, к. фил. н., доцент,

<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,  
e-mail: ecolab2@gmail.com

Изучена реакция почвенной альгоцианофлоры на фосфориты Верхнекамские бедные (ФВБ), предназначенные для использования в качестве удобрений. Наиболее чувствительной группой фототрофных микроорганизмов по отношению к ФВБ оказались цианобактерии (ЦБ), отзывчивые на фосфор. По сравнению с контролем их видовое разнообразие в варианте с добавкой ФВБ 0,5 г/кг увеличилось в полтора раза. Внесение ФВБ привело к увеличению и количественных показателей ЦБ в почве. Численность клеток ЦБ возросла в вариантах: 0,2 г/кг – на 30%; 0,5 г/кг – на 51,7%; 1,0 г/кг – на 57,8%. Общая численность микрофототрофов увеличилась со 174 тыс. кл./г почвы (контроль) до 222 тыс. кл./г почвы (0,5 г/кг).

**Ключевые слова:** почвенная альгоцианофлора, агрозёмы, глаукониты, фосфориты Верхнекамские бедные.

## Transformation of soil algocyanoflora under the influence of Verkhnekamsk lean rock phosphorites

© 2023. L. V. Kondakova<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2190-686X, N. V. Syrchina<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-8049-6760,  
T. Ya. Ashikhmina<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-4919-0047, I. A. Kondakova<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9336-8709

<sup>1</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,

<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: ecolab2@gmail.com

The research deals with soil algocyanoflora reaction to Verkhnekamsk lean rock phosphorites which are used as natural fertilizers. Cyanobacteria turned out to be the most sensitive to Verkhnekamsk lean rock phosphorites; they are responsive to phosphorus and to reduction of soil acidity. As compared with the control, after adding 0.5 g/kg Verkhnekamsk lean rock phosphorites, their species diversity in the variant increased 1.5 times. Introduction of Verkhnekamsk lean rock phosphorites caused increase in cyanobacteria quantity as well. The number of cyanobacteria cells increased in the variants: 0.2 g/kg by 30%, 0.5 g/kg by 51.7%, 1.0 g/kg by 57.8%. The overall number of micophototrophic cells increased from 174.0±14.3 thousand cells per 1 g of soil to 222.3±15.8 thousand cells per 1 g of soil (0.5 g/kg).

**Keywords:** soil algocyanoflora, agrozeams, glauconites, Verkhnekamsk lean rock phosphorites.

К числу важнейших экологических проблем современного сельскохозяйственного производства относится ухудшение состояния обрабатываемых земель и снижение почвенного плодородия. Ориентация на интенсивные

системы земледелия приводит к ухудшению структуры почвы, нарушению баланса питательных элементов, накоплению в пашне токсичных соединений, важнейшими источниками которых являются пестициды, удобрения

ния, искусственные почвенные мелиоранты (синтетический карбонат кальция, фосфогипс, хлорид кальция и др.) [1]. В результате антропогенного воздействия изменяются не только физические и химические характеристики почв, но и состав почвенной микробиоты, играющей ключевую роль в создании почвенного плодородия, способности почв к самоочищению и реализации биологических механизмов супрессивности [2]. По имеющимся оценкам, в 1 г почвы может содержаться более 1 млрд микроорганизмов (МО), включая бактерии (в том числе цианобактерии (ЦБ) и актиномицеты), грибы, водоросли, простейшие. Видовое разнообразие населяющих почву МО достигает 1 000 – 1 000 000 видов в 1 г почвы [3, 4]. Между отдельными почвенными МО складываются многоплановые консортивные связи и отношения, благодаря которым формируются микробоценозы. Устойчивое и продуктивное функционирование подобных сообществ во многом определяется наличием и разнообразием почвенных фотоавтотрофов, важнейшими представителями которых являются микроводоросли (МВ) и ЦБ [5, 6].

Почвенная альгоцианофлора принимает активное участие в таких глобальных экологических процессах, как фотосинтез, фиксация атмосферного азота, почвообразование, круговорот фосфора, благодаря чему формируется среда обитания для других организмов. Эукариотические водоросли и ЦБ могут не только обогащать почву биодоступными питательными веществами, но и повышать плодородие за счёт синтеза широкого спектра полисахаридов, антибиотиков, фитогормонов (абсцизовая кислота, цитокинин, гиббереллины, этилен), а также других метаболитов, способствующих росту растений [7–9]. Исследования последних лет показывают, что культуры ЦБ и МВ могут найти применение в качестве эффективных биоудобрений [10], при этом оптимальные условия для развития ЦБ создаются в нейтральных или слабо щелочных почвах [11].

Активное антропогенное воздействие на почвы приводит к глубокой трансформации естественных микробосообществ и нарушению баланса между различными группами автотрофных и гетеротрофных МО. Реакция МВ и ЦБ на химические вещества в окружающей среде может варьироваться от гибели до появления «цветения» почвы. Длительные периоды интенсивного применения химических удобрений вызывают сокращение разнообразия микротофотрофов и их численности [2, 12], что неизбежно отражается на плодородии

и здоровье почв. Определённой альтернативой некоторым химическим удобрениям могут служить природные минералы (фосфориты, глаукониты, цеолиты, бентониты), внесение которых приводит к восполнению дефицита элементов питания, накоплению органического вещества, улучшению структуры и биологических свойств почвы [13]. Однако вопрос об их влиянии на почвенную альгоцианофлору остаётся открытым [14]. Особенно мало сведений о сочетанном воздействии на альгоцианофлору природных материалов, содержащих несколько различных минералов. К таким материалам можно отнести глауконитсодержащие хвосты обогащения фосфоритов, основными компонентами которых являются глауконит и фосфориты мелких фракций. Известно, что почвенная альгоцианофлора весьма отзывчива на фосфорные удобрения [15]. О влиянии глауконитов на обитающие в почве ЦБ и МВ практически ничего не известно.

Цель настоящей работы состояла в изучении основных направлений трансформации почвенной альгоцианофлоры под влиянием разных норм внесения глауконитсодержащих хвостов обогащения фосфоритов (фосфоритов Верхнекамских бедных), предназначенных для использования в качестве почвенных мелиорантов.

### Материалы и методы

Для проведения исследований использовали фосфориты Верхнекамские бедные (ФВБ), получаемые из хвостов обогащения фосфоритной руды (ХОФ) Вятско-Камского месторождения в соответствии с ТУ 08.91.19-002-85629294-2020, и предназначенные для использования в качестве почвенного мелиоранта, а также для включения в состав органоминеральных удобрений и почвогрунтов. Продукт представляет собой однородный мелкозернистый сыпучий материал зеленовато-серого цвета. Основными компонентами ХОФ, используемых для получения ФВБ являются глаукониты, фосфориты мелких фракций, кварц, известковые и глинистые материалы. Различные минералы образуют между собой трудноразделимые сростки, что затрудняет разделение ХОФ на отдельные компоненты. Содержание глауконитов в соответствующем материале может достигать 70% [16]. Возможность и перспективность использования ХОФ в качестве почвенного мелиоранта или компонента удобрений обоснована в публикациях [17, 18].

Химический анализ образцов ФВБ, используемых для проведения исследований, выполняли атомно-эмиссионным и масс-спектральными методами. Согласно полученным результатам, массовая доля определяемых компонентов в образцах ФВБ составила (в %):  $P_2O_5$  – 6,1;  $K_2O$  – 3,4; S – 1,2; CaO – 9,4; MgO – 1,7. Содержание токсичных элементов (мг/кг): Cd – 0,20; Pb – 14,2; As – 37,6; Hg < 0,005.

В качестве субстрата для оценки различных норм внесения ФВБ на альгоцианофлору использовали образцы агрозёма с содержанием гумуса 5,5%;  $P_2O_5$  – 120 мг/кг;  $K_2O$  – 115 мг/кг;  $pH_{KCl}$  6,7; сумма поглощённых оснований – 22,4 ммоль/100 г. Добавки ФВБ вносили в воздушно-сухой субстрат согласно вариантам эксперимента и перемешивали.

Варианты эксперимента: 1) агрозём без добавок (контроль); 2) агрозём + ФВБ (0,2 г/кг); 3) агрозём + ФВБ (0,5 г/кг); 4) агрозём + ФВБ (1,0 г/кг).

Видовой состав развивающихся в субстрате фототрофов выявляли методами постановки водных и чашечных культур со «стёклами обрастания» [19]. Инкубация культур проходила при дневном освещении. Определение водорослей и ЦБ проводили с использованием отечественных и зарубежных определителей.

Все экспериментальные исследования выполняли в лабораторных условиях в трёхкратной повторности. Для статистической обработки результатов применяли стандартные методы с использованием встроенного пакета программ Excel, STATISTICA 10.

### Результаты и обсуждение

В вариантах эксперимента по изучению реакции почвенных фототрофных МО на разные дозы удобрения выявлено 38 видов микрфототрофов, в том числе: Cyanobacteria – 14; Chlorophyta – 10; Xanthophyta – 4; Eustigmatophyta – 2; Bacillariophyta – 7; Euglenophyta – 1. Наиболее богатым в видовом отношении таксоном являлись ЦБ – 36,8% выявленного видового разнообразия. Доля представителей Chlorophyta составляла 26,4%, Bacillariophyta – 18,5%. Альгофлора других таксонов была представлена небольшим числом видов. Результаты экспериментальных исследований, характеризующие влияние добавок ФВБ на видовое разнообразие почвенных фототрофных МО, представлены в таблице 1.

Небольшие различия между разными вариантами проявились в видовом составе ЦБ.

Ряд видов ЦБ был отмечен только в вариантах с более высокой добавкой ФВБ (0,5 г/кг и 1,0 г/кг): *Anabaena cylindrica*, *Nostoc punctiforme*, *Leptolyngbya fragilis*, *Phormidium formosum*. Наиболее значительное влияние ФВБ на видовое разнообразие микрфототрофов было выявлено в варианте 3 (добавка ФВБ 0,5 г/кг). В соответствующем варианте число выявленных видов увеличилось на 22%.

В таблице 2 приведены данные о влиянии добавок ФВБ на видовое разнообразие выявленных таксонов.

Анализ видового разнообразия микрфототрофов по таксономическим группам показал влияние нормы вносимых ФВБ на реализацию их видового потенциала. Наиболее чувствительной группой по отношению к ФВБ оказались ЦБ, отзывчивые на фосфор и низкую кислотность почвы (в опыте  $pH_{KCl}$  6,7). По сравнению с контролем, их видовое разнообразие в варианте 3 (добавка ФВБ 0,5 г/кг) увеличилась в полтора раза (8 и 12 видов соответственно). Роль ЦБ в формировании почвенного плодородия трудно переоценить. Биологическая продуктивность почв в основном лимитируется содержанием в них связанного азота. Цианобактерии в процессе жизнедеятельности влияют на азотный режим почвы и её плодородие в результате способности к азотфиксации. Они принимают участие в обогащении почвы азотом, активизируют деятельность гетеротрофных азотфиксаторов, служат источником органического вещества как энергетического материала для гетеротрофных МО. В процессе жизнедеятельности ЦБ синтезируют и выделяют в окружающую среду вещества различной химической природы и биологической активности. Увеличение видового разнообразия ЦБ в почве под влиянием ФВБ можно считать одним из факторов повышения почвенного плодородия.

Состав доминирующих видов, выявленных в разных вариантах эксперимента, сохраняет большое сходство (табл. 3). Однако, если в контрольном варианте и в варианте с минимальной добавкой ФВБ (0,2 г/кг) на первое место среди доминантов выходят диатомовые водоросли, то в вариантах с более высокими добавками ФВБ (0,5 г/кг и 1,0 г/кг) – отзывчивые на фосфор ЦБ.

Для оценки сходства результатов, полученных в различных вариантах эксперимента, использовали коэффициент Жаккара (табл. 4).

Внесение ФВБ привело к изменению состава почвенных фототрофных МО во всех вариантах относительно контроля.

Таблица 1 / Table 1

Влияние добавок фосфоритов Верхнекамских бедных на видовое разнообразие почвенных фототрофных микроорганизмов / Effect of different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites on species diversity of soil phototrophic microorganisms

№ п/п	Таксоны, виды / Taxons, species	Вариант / Variant			
		1	2	3	4
<b>Cyanobacteria</b>					
1	<i>Anabaena</i> sp.	+	+	+	-
2	<i>Anabaena cylindrica</i> Lemm.	-	-	-	+
3	<i>Cylindrospermum licheniforme</i> (Bory) Kütz.	+	+	+	+
4	<i>Leptolyngbya angustissima</i> (W. et G.S. West) Anagn. et Kom.	+	+	+	+
5	<i>Leptolyngbya foveolarum</i> (Rabenh. et Gom.) Anagn. et Kom.	+	+	+	-
6	<i>Leptolyngbya frigida</i> (Fritsch) Anagn. et Kom.	+	+	+	+
7	<i>Leptolyngbya fragilis</i> (Gom.) Anagn. et Kom.	-	-	+	+
8	<i>Leptolyngbya hollerbachiana</i> (Elenk.) Anagn. et Kom.	+	+	-	-
9	<i>Nostoc paludosum</i> Kütz.	+	-	+	+
10	<i>Nostoc punctiforme</i> (Kütz.) Hariot	-	-	+	-
11	<i>Phormidium autumnale</i> (Ag.) Gom.	+	+	+	+
12	<i>Phormidium formosum</i> (Bory ex Gom.) Anagn. et Kom.	-	-	+	+
13	<i>Phormidium tenue</i> (Ag. ex Gom.) Anagn. et Kom.	-	+	+	-
14	<i>Pseudanabaena catenata</i> Lauterb.	-	-	+	+
Всего / Total		8	8	12	9
<b>Chlorophyta</b>					
15	<i>Chlamydomonas gloeogama</i> Korsch. in Pasch. var. <i>gloeogama</i>	+	+	+	+
16	<i>Chlamydomonas gelatinosa</i> Korsch. in Pascher	-	+	+	+
17	<i>Chlorella minutissima</i> Fott et Novakova	-	+	+	-
18	<i>Chlorella vulgaris</i> Beijer.	+	+	+	+
19	<i>Chlorococcum infusionum</i> (Schrank) Menegh.	+	+	+	+
20	<i>Macrochloris dissecta</i> Korsch.	-	-	+	+
21	<i>Palmella miniata</i> Leibl.	+	+	-	-
22	<i>Pseudococcomyxa simplex</i> (Mainx) Fott	+	+	+	-
23	<i>Tetracystis aggregata</i> Brown et Bold	+	-	+	-
24	<i>Chlorophyta</i> sp.	+	+	+	+
Всего / Total		7	7	9	6
<b>Xanthophyta</b>					
25	<i>Pleurochloris pyrenoidosa</i> Pasch.	+	-	-	-
26	<i>Pleurochloris commutata</i> Pasch.	+	+	+	+
27	<i>Xanthonema bristolianum</i> (Pasch.) Silva	+	+	+	+
28	<i>Xanthonema exile</i> (Klebs) Silva	-	-	+	-
Всего / Total		3	2	3	2
<b>Eustigmatophyta</b>					
29	<i>Eustigmatos magnus</i> (B. Petersen) Hibberd	+	-	+	-
30	<i>Vischeria helvetica</i> (Vischer et Pasch.) Hibberd	-	-	-	+
Всего / Total		1	0	1	1
<b>Bacillariophyta</b>					
31	<i>Amphora ovalis</i> Kütz.	+	+	+	+
32	<i>Hantzschia amphioxys</i> (Ehr.) Grun. in Cleve et Grun.	+	+	+	+
33	<i>Luticola mutica</i> (Kütz.) Mann in Round et al.	+	+	+	+
34	<i>Navicula atomus</i> (Kütz.) Grun.	+	-	+	-
35	<i>Navicula pelliculosa</i> (Breb.) Hilse	+	+	+	+
36	<i>Nitzschia palea</i> (Kütz.) W. Smith	+	+	+	+
37	<i>Pinnularia intermedia</i> Lagerst.	+	+	+	+
Всего / Total		7	6	7	6
<b>Euglenophyta</b>					
38	<i>Euglena mutabilis</i> Schmitz	+	+	+	+
Всего / Total		1	1	1	1
Итого / Total amount		27	24	33	25

Примечание. Варианты: 1 – контроль; 2 – 0,2 г/кг; 3 – 0,5 г/кг; 4 – 1 г/кг почвы; «+» – наличие вида; «-» – отсутствие вида.  
 Note. Variants: 1 – control; 2 – 0.2 g/kg; 3 – 0.5 g/kg; 4 – 1 g/kg soil; “+” – presence of the species; “-” – absence of the species.

Таблица 2 / Table 2

Влияние добавок фосфоритов Верхнекамских бедных на видовое разнообразие выявленных таксонов  
Effect of different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites on species diversity of the taxons registered

Вариант Variant	Cуano- bacteria		Chloro- phyta		Xantho- phyta		Eustig- matophyta		Bacilla- riophyta		Eugleno- phyta		Всего Total
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	8	29,6	7	25,9	3	11,2	1	3,7	7	25,9	1	3,7	27
2	8	33,3	7	29,2	2	8,3	0	0	6	25,0	1	4,2	24
3	12	36,4	9	27,3	3	9,1	1	3,0	7	21,2	1	3,0	33
4	9	37,5	5	20,8	2	8,3	1	4,2	6	25,0	1	4,2	23
Всего Total	44	36,8	40	26,4	4	10,5	2	5,2	7	18,5	4	2,6	38

Примечание: 1 – число выявленных видов в варианте; 2 – процент.  
Note: 1 – the number of species found in the variant; 2 – percentage.

Таблица 3 / Table 3

Доминирующие виды микрофототрофов в вариантах с различными добавками  
фосфоритов Верхнекамских бедных / Dominant species in the variants with different  
additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites

Вариант / Variant	Доминирующие виды микрофототрофов / Dominant species of microphototrophs
Контроль Control	<i>Nitzschia palea</i> , <i>Hantzschia amphioxys</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> , <i>Phormidium autumnale</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> (диатомовые водоросли и цианобактерии / diatoms and cyanobacteria)
0,2 г/кг 0.2 g/kg	<i>Nitzschia palea</i> , <i>Luticola mutica</i> , <i>Leptolyngbya frigida</i> (диатомовые водоросли и цианобактерии / diatoms and cyanobacteria)
0,5 г/кг 0.5 g/kg	<i>Phormidium autumnale</i> , <i>Leptolyngbya foveolarum</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> (цианобактерии и диатомовые водоросли / cyanobacteria and diatoms)
1,0 г/кг 1.0 g/kg	<i>Nostoc paludosum</i> , <i>Leptolyngbya angustissima</i> , <i>L. foveolarum</i> , <i>Luticola mutica</i> , <i>Nitzschia palea</i> , <i>Navicula pelliculosa</i> (цианобактерии и диатомовые водоросли / cyanobacteria and diatoms)

Таблица 4 / Table 4

Коэффициенты Жаккара (%) в вариантах с различными добавками фосфоритов верхнекамских бедных  
Jaccard coefficient (%) in variants with different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites

Варианты / Variants	1	2	3	4
Контроль / Control		75,8	66,6	56,2
0,2 г/кг / 0.2 g/kg			95,8	62,1
0,5 г/кг / 0.5 g/kg				64,7
1,0 г/кг / 1.0 g/kg				

Таблица 5 / Table 5

Количественные показатели альгоцианофлоры (тыс. кл. /г почвы) в вариантах с различными  
добавками фосфоритов верхнекамских бедных / Quantitative index of algocyanoflora (thousand cells  
per 1 g soil) in variants with different additives of Vekhnekamsk lean rock phosphorites

Варианты Variants	Cyanobacteria	Chlorophyta+ Xanthophyta	Bacillariophyta	Всего / Total
Контроль / Control	109,7±7,1	34,0±2,8	30,3±4,3	174,0±14,3
0,2 г/кг / 0.2 g/kg	142,7±17,1	35,9±4,3	27,4±4,3	206,0±25,7
0,5 г/кг / 0.5 g/kg	166,4±8,6	36,9±2,8	18,9±4,3	222,3±15,8
1,0 г/кг / 1.0 g/kg	173,1±28,8	38,8±4,3	28,4±2,8	241,9±35,9

Отмечено высокое сходство вариантов с внесением ФВБ в дозах 0,2 г/кг и 0,5 г/кг (коэффициент Жаккара 95,8%). В варианте с более высокой добавкой ФВБ (1,0 г/кг) коэффициент сходства был значительно ниже – 56,2% (табл. 4).

Важное значение в оценке трансформации экологического состояния почвенной среды под влиянием воздействующего фактора имеют количественные показатели альгоцианофлоры (табл. 5).

Количественный учёт альгоцианофлоры в вариантах эксперимента показал положительную реакцию ЦБ на вносимое удобрение. С увеличением добавки ФВБ численность клеток ЦБ возросла в варианте 0,2 г/кг на 30%, варианте 0,5 г/кг – на 51,7%, варианте 1,0 г/кг – на 57,8%. Общая численность клеток микрофототрофов увеличилась с 174,0±14,3 тыс. кл./ г почвы (в контроле) до 222,3±15,8 тыс. кл./ г почвы в опытном варианте 0,5 г/кг.

### Заключение

Почвенные фототрофные МО проявляют выраженную чувствительность к нормам вносимых ФВБ. Наибольший эффект был получен при внесении ФВБ в дозе 0,5 г на 1 кг почвы (примерно 1,0–1,5 т/га).

Наибольшую чувствительность к добавке ФВБ проявили ЦБ, отзывчивые на фосфор. По сравнению с контролем, их видовое разнообразие в варианте 3 (добавка ФВБ 0,5 г/кг) увеличилось в полтора раза (8 и 12 видов соответственно).

Внесение в субстрат (агрозём) ФВБ изменяет соотношение доминирующих видов. Доминантами сообщества становятся ЦБ. В контрольном варианте доминирующей группой являются диатомовые водоросли.

Коэффициент Жаккара показал высокое сходство альгоцианофлоры вариантов с внесением ФВБ в дозах 0,2 и 0,5 г/кг – 95,8%. В варианте с более высокой добавкой (1 г/кг) данный коэффициент составил 56,2%.

Внесение ФВБ оказывает влияние на количественные показатели клеток микрофототрофов. С увеличением добавки ФВБ численность клеток ЦБ возросла в варианте 0,2 г/кг на 30%, варианте 0,5 г/кг – на 51,7%, варианте 1,0 г/кг – на 57,8%. Общая численность клеток микрофототрофов увеличилась с 174,0±14,3 тыс. кл./ г почвы (контроль) до 222,3±15,8 тыс. кл./ г почвы (0,5 г/кг). Результаты проведённого исследования могут быть использованы при расчёте норм внесения ФВБ в почву в качестве удобрения и мелиоранта.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 1220401000325.*

### References

1. Shchapova L.N., Purtova L.N., Kiseleva I.V. Influence of surface treatment and fertilization level on microflora of agrozems and humus accumulation in the cultivation of perennial grasses // Vestnik DVO RAN. 2019. No. 1 (203). P. 44–50 (in Russian). doi: 10.25808/08697698.2019.203.1.005
2. Abinandan S., Subashchandrabose S.R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Soil microalgae and cyanobacteria: the biotechnological potential in the maintenance of soil fertility and health // Critical reviews in biotechnology. 2019. V. 39. No. 8. P. 981–998. doi: 10.1080/07388551.2019.1654972
3. Johns C. Living soils: the role of microorganisms in soil health // Future Directions International. 2017. V. 1. No. 7 [Internet resource] <https://apo.org.au/sites/default/files/resource-files/2017-06/apo-nid96931.pdf> (Accessed: 21.11.2023).
4. Dequiedt S., Saby N.P.A., Lelievre M., Jolivet C., Thioulouse J., Toutain B., Arrouays D., Bispo A., Lemanceau P., Ranjard L. Biogeographical patterns of soil molecular microbial biomass as influenced by soil characteristics and management // Global Ecology and Biogeography. 2011. V. 20. No. 4. P. 641–652. doi:10.1111/j.1466-8238.2010.00628.x
5. Chamizo S., Cant n Y., Rodriguez-Caballero E., Domingo F. Biocrusts positively affect the soil water balance in semiarid ecosystems // Ecohydrology. 2016. V. 9. No. 7. P. 1208–1221. doi: 10.1002/eco.1719
6. Samolov E., Baumann K., B del B., Jung P., Leinweber P., Mikhailyuk T., Karsten U., Glaser K. Biodiversity of algae and cyanobacteria in biological soil crusts collected along a climatic gradient in Chile using an integrative approach // Microorganisms. 2020. V. 8. No. 7. Article No. 1047. doi: 10.3390/microorganisms8071047
7. Ramakrishnan B., Maddela N.R., Venkateswarlu K., Megharaj M. Potential of microalgae and cyanobacteria in improving soil health and agricultural productivity – a critical view // Environmental Science: Advances. 2023. No. 2. P. 586–611. doi: 10.1039/D2VA00158F
8. Alvarez A.L., Weyers S.L., Goemann H.M., Peyton B.M., Gardner R.D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture // Algal Research. 2021. V. 54. Article No. 102200. doi: 10.1016/j.algal.2021.102200
9. Kuraganti G., Edla S., Pallaval V.B. Cyanobacteria as biofertilizers: current research, commercial aspects, and future challenges // Advances in Plant Microbi-

ome and Sustainable Agriculture. Microorganisms for Sustainability / Eds. A. Yadav, A. Rastegari, N. Yadav, D. Kour. Singapore: Springer, 2020. V. 20. P. 259–278. doi: 10.1007/978-981-15-3204-7\_11

10. Guo S., Wang P., Wang X., Zou M., Liu C., Hao J. Microalgae as biofertilizer in modern agriculture // Microalgae biotechnology for food, health and high value products / Eds. M.A. Alam, J.L. Xu, Z. Wang. Singapore: Springer, 2020. P. 397–411. doi: 10.1007/978-981-15-0169-2\_12

11. Shtina E.A. Soil algae as ecological indicators // Botanicheskiy Zhurnal. 1990. V. 75. No. 4. P. 344–453 (in Russian).

12. Domracheva L.I. Soil “blooming” and laws of its development. Syktyvkar, 2005. 336 p. (in Russian).

13. Pyndak V.I., Novikov A.E. Natural ameliorants on the basis of silica and alumina // Izvestiya Nizhnevolskogo agrouniversitetskogo kompleksa nauka i vysshee professional'noe obrazovanie. 2015. No. 2 (38). P. 73–76 (in Russian).

14. Kondakova L.V., Syrchina N.V., Pilip L.V., Kondakova I.A. Manure runoff impact on soil phototrophic microorganisms // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 2. P. 190–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-190-197

15. Markou G., Vandamme D., Muylaert K. Microalgal and cyanobacterial cultivation: The supply of nutrients // Water research. 2014. V. 65. P. 186–202. doi: 10.1016/j.watres.2014.07.025

16. Syrchina N.V., Bogatyryova N.N., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Tailings of enrichment of phosphorites of the Vyatka-Kama deposit as secondary material resources for the production of natural fertilizers // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 2. P. 107–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-107-114

17. Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya., Kantor G.Ya. Natural sulfur fertilizer with activated peat and glauconitic efel // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 134–141 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-134-141

18. Syrchina N.V., Asikhmina 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

19. Shtina E.A., Gollerbach M.M., Ecology of soil algae. Moskva: Nauka, 1976. 144 p. (in Russian).

## Экологические проекты инициативного бюджетирования

© 2023. В. В. Вагин, к. филос. н., руководитель  
Центра инициативного бюджетирования,  
В. А. Паксиваткина, эксперт Центра инициативного бюджетирования,  
Научно-исследовательский финансовый институт Минфина России,  
125375, Россия, г. Москва, Настасьинский переулок, д. 3, стр. 2,  
e-mail: vvaginster@gmail.com, paksivatkina@nifi.ru

В статье рассматриваются экологические проекты инициативного бюджетирования как форма вовлечения граждан в экологическую повестку. Авторами составлена классификация экологических проектов, инициируемых гражданами – проекты по организации сбора твёрдых коммунальных отходов и мусора, проекты в сфере пожарной безопасности, проекты по обеспечению поселений чистой питьевой водой. На основе базы данных Всероссийского конкурса лучших проектов инициативного бюджетирования отобраны числовые показатели о реализации экологических проектов (количество, стоимость, благополучатели). Рассмотрен зарубежный опыт вовлечения жителей в экологическую повестку – зелёное партисипаторное бюджетирование. Отмечен уникальный опыт по вовлечению школьников и молодёжи в вопросы климатической и экологической повестки в некоторых зарубежных странах. Проекты инициативного бюджетирования служат индикаторами действительных запросов и потребностей граждан. Также в тексте статьи отмечается возможность использования базы данных Всероссийского конкурса проектов инициативного бюджетирования как уникального информационного ресурса о практиках гражданского вовлечения.

**Ключевые слова:** инициативное бюджетирование, партисипаторное бюджетирование, экологические проекты инициативного бюджетирования, вовлечение граждан в экологическую повестку.

## Ecological initiative budgeting projects

© 2023. V. V. Vagin ORCID: 0000-0001-5570-2593  
V. A. Paksivatkina ORCID: 0000-0001-8905-5785  
Financial Research Institute of the Ministry of Finance of the Russian Federation,  
3, b. 2, Nastasyinsky Lane, Moscow, Russia, 125375,  
e-mail: vvaginster@gmail.com, paksivatkina@nifi.ru

Ecological projects of initiative budgeting are considered in the article as a form of involving citizens in the ecological agenda. The classification of ecological projects initiated by citizens was compiled by the authors. These are projects of organizing the collection of solid waste and garbage, projects in the field of fire safety, projects to provide settlements with clean drinking water. Based on the database of the All-Russian contest of the best projects of initiative budgeting, numerical indicators on the implementation of ecological projects (number, cost, beneficiaries) were selected. The foreign experience of involving citizens in the environmental agenda – green participatory budgeting – was presented. The unique experience of involving schoolchildren and youth in climate and environmental issues in some foreign countries was described. A review of Russian initiative projects in the field of ecology was carried out. It is concluded that there is the emergence of a trend to involve citizens in the ecological agenda. Initiative budgeting projects serve as indicators of the actual requests and needs of citizens. It is also noted that it is reasonable to use the database of the All-Russian competition of initiative budgeting projects as a unique information resource about the practices of civic engagement.

**Keywords:** initiative budgeting, participatory budgeting, ecological initiative budgeting projects, participation of citizens in the ecological agenda.

Вовлечение граждан в процесс принятия бюджетных решений и в управление общественными финансами является общемировым трендом. В России совокупность практик участия граждан в бюджетном процессе получила название

инициативное бюджетирование (ИБ). Существует несколько неотъемлемых черт практик ИБ: 1) обсуждение бюджетных вопросов в ходе реализации проектов; 2) участие в процессе представителей власти; 3) ежегодно повторяющийся процесс реали-

зации практики; 4) организация публичной отчётности о реализованных проектах [1].

Наиболее развитыми практиками ИБ в России является программа поддержки местных инициатив (далее – ПМИ), практика бюджетных комиссий, практика инициативных проектов, реализуемая исключительно на муниципальном уровне, практики школьного и молодёжного ИБ. Кроме того, в последние годы стремительно развиваются механизмы финансового участия граждан в реализации выдвинутых ими инициатив через софинансирование проектов ИБ, софинансирование проектов, реализуемых в рамках отдельных госпрограмм и нацпроектов, софинансирование проектов через краудфандинговые платформы [2].

Большую популярность в России и зарубежных странах в последние годы приобретают практики гражданского вовлечения в решение вопросов экологической направленности [3]. Такие практики в разных масштабах уже реализуются в Португалии, Франции, Испании, Эквадоре, Конго, Китае, Мозамбике, Мексике и Индонезии [3–5]. Практики реализуются как на региональном, так и на муниципальном (поселенческом) уровне. Основной целью практик является экологическое просвещение граждан разных возрастов и их последующее вовлечение в решение вопросов по борьбе и адаптации к изменениям климата, по энергосбережению и развитию альтернативных источников энергии, смягчение других экологических рисков.

Реализация практик вовлечения жителей в экологическую повестку напрямую отвечает Целям устойчивого развития ООН до 2030 г. (которые ложатся в основу стратегического планирования многих регионов и городов мира), а именно – целям 16.7 «Обеспечить ответственное принятие решений репрезентативными органами на всех уровнях с участием всех слоёв общества», 13.3 «Улучшить просвещение, распространение информации и возможности людей и учреждений по смягчению остроты и ослаблению последствий изменения климата, адаптации к ним и раннему предупреждению» и 11.3 «К 2030 году расширить масштабы открытой для всех и экологически устойчивой урбанизации и возможности для комплексного и устойчивого планирования населённых пунктов и управления ими на основе широкого участия во всех странах» [6, 7].

В России также имеется значительный опыт поддержки и реализации гражданских

инициатив в сфере экологии. На протяжении многих лет механизм ИБ позволяет жителям за счёт бюджетной поддержки и средств софинансирования реализовать экологические инициативы, направленные на решение насущных проблем своих поселений и городов [8].

На федеральном уровне также предпринимаются попытки по развитию экологического образования и поддержке экологических проектов граждан. В 2022 г. был создан Единый фонд поддержки и развития экологических инициатив «Компас», основными направлениями деятельности которого стали построение системы взаимодействия в законодательских инициативах в области экологии, разработка научно-технологических проектов, поддержка общественных организаций и экологическое просвещение [9].

Целью данной работы является систематизация и описание опыта реализации экологических проектов инициативного (партиципаторного) бюджетирования в России и в зарубежных странах – зарождающегося тренда по вовлечению граждан в экологическую повестку.

### **Развитие инициативного бюджетирования в России**

Ежегодно Центром инициативного бюджетирования Научно-исследовательского финансового института Минфина России проводится оценка состояния и развития ИБ и других форм общественного участия в бюджетном процессе [10]. Оценка реализуется посредством организации сбора данных в форме мониторинга в субъектах Российской Федерации (РФ) и муниципальных образованиях. Так, по итогам проводимого цикла мониторинга в 2022 г. 76 субъектов РФ реализовывали практики ИБ. За 2022 г. был реализован 29 371 проект инициативного бюджетирования. Общая стоимость проектов достигла 44,46 млрд руб., в том числе из бюджетов субъектов РФ – 23,893 млрд руб., из федерального бюджета – 9,963 млрд руб., из бюджетов муниципальных образований – 7,552 млрд руб., софинансирование со стороны граждан – 1,542 млрд руб., софинансирование со стороны индивидуальных предпринимателей и юридических лиц на реализацию проектов – 0,706 млрд руб. (рис.). Объём инициативных платежей граждан и юридических лиц составил 0,802 млрд руб. [11].

### Гражданские проекты экологической направленности (по данным Всероссийского конкурса лучших проектов инициативного бюджетирования)

Ежегодно в целях выявления и распространения опыта лучших проектов ИБ в России, а также для стимулирования развития ИБ организуется Всероссийский конкурс лучших проектов инициативного бюджетирования. Организатором конкурса с 2020 г. является Научно-исследовательский финансовый институт Минфина России. В 2023 г. конкурс проводился в седьмой раз.

Приём заявок и голосование за проекты с 2023 г. реализуется на портале МоиФинансы.рф [8]. Определение проектов-победителей в конкурсе проводится в два этапа. На первом этапе отбираются 15 проектов в каждой номинации, которые получили наибольшее количество оценок по итогам голосования граждан за проекты на портале. На втором этапе из числа предварительно отобранных проектов выбираются по 1 победителю и по 2 финалиста в каждой номинации. Итоговая оценка проектов формируется после голосования членов конкурсной комиссии, в состав которой входят руководители Минфина России и НИФИ

Минфина России, специалисты Центра инициативного бюджетирования, представители благотворительного фонда Сбербанка «Вклад в будущее», представители Общественной Палаты Российской Федерации, учёные и эксперты. Победители Всероссийского конкурса проектов инициативного бюджетирования во всех номинациях получают дипломы и денежное вознаграждение на реализацию будущих проектов.

Анализ массива поступающих на конкурс проектных заявок за несколько лет позволил выделить из типологии несколько видов проектов, которые имеют отношение к экологической повестке – классифицировать экологические проекты ИБ:

- организация сбора твёрдых коммунальных отходов и мусора: обустройство и строительство площадок накопления твёрдых коммунальных отходов – контейнерных площадок; организация субботников;
- пожарная безопасность: ремонт подъездных дорог к пожарным водоёмам, а также их обустройство и очистка; ремонт зданий пожарных депо и приобретение техники для пожаротушения;
- обеспечение чистой питьевой водой: ремонт и замена водонапорных башен, водопроводной сети, артезианских скважин,

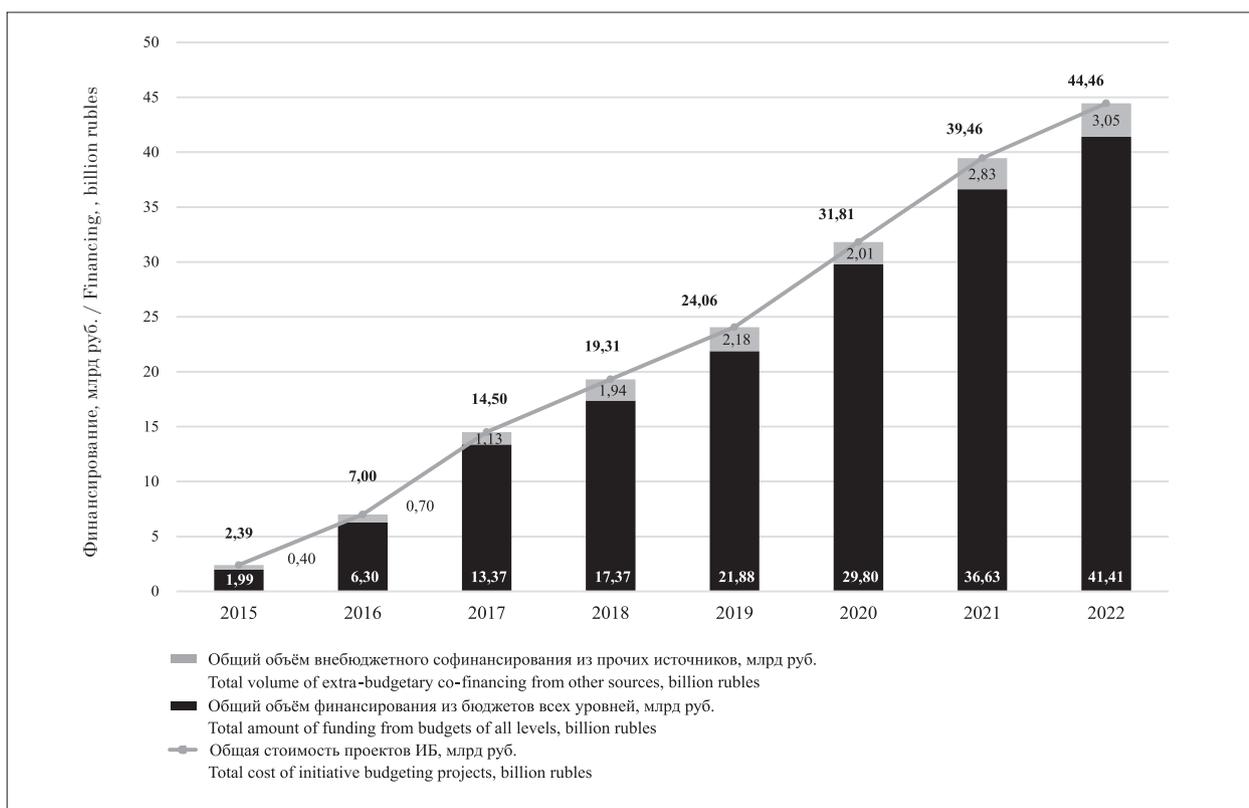


Рис. Финансовое обеспечение проектов инициативного бюджетирования (ИБ) в 2015–2022 гг., млрд руб. [12–15] / Fig. Financing of initiative budgeting projects in 2015–2022, billion rubles [12–15]

Таблица 1 / Table 1

Количество проектов экологической направленности, представленных на Всероссийский конкурс лучших проектов инициативного бюджетирования и их стоимость / Number of ecological projects submitted to the All-Russian competition for the best initiative budgeting projects and their cost

Тип проекта Project type	Количество заявок на конкурс Number of applications for the competition				Общая стоимость проектов, млн руб. Total cost of projects, million rubles			
	Год / Year							
	2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
Водоснабжение и водоотведение / Water supply and sanitation	26	28	33	29	28,82	89,14	88,53	47,65
Пожарная безопасность Fire safety	6	10	12	10	1,67	5,14	12,11	11,93
Организация сбора твёрдых коммунальных отходов и мусора Organization of collection of municipal solid waste and garbage	4	8	11	9	3,22	5,12	8,14	7,62
Итого / Total	36	46	56	48	33,71	99,4	108,78	67,2

Таблица 2 / Table 2

Количество участников инициативных групп и число благополучателей проектов экологической направленности, представленных на Всероссийский конкурс лучших проектов инициативного бюджетирования / The number of participants in initiative groups and the number of beneficiaries of ecological projects submitted to the All-Russian competition for the best initiative budgeting projects

Тип проекта Project type	Количество участников инициативной группы Number of initiative group members				Количество благополучателей Number of beneficiaries			
	Год / Year							
	2019	2020	2021	2022	2019	2020	2021	2022
Водоснабжение и водоотведение / Water supply and sanitation	212	891	1881	177	37757	14334	27522	79552
Пожарная безопасность Fire safety	43	92	198	73	2960	4135	12723	27298
Организация сбора твёрдых коммунальных отходов и мусора Organization of collection of municipal solid waste and garbage	12	100	3776	40	7348	8624	15952	37181
Итого / Total	267	1083	5855	290	48065	27093	56197	144031

приобретение водовозной техники; ремонт очистных сооружений, ремонт и обустройство подземных ливневых сетей, приобретение каналопромывочного оборудования; обустройство родников, обустройство и ремонт колодцев [8].

В таблицах 1 и 2 представлены данные о проектах ИБ из вышеописанной типологии, реализованных за период 2019–2022 гг. Данные демонстрируют наличие возрастающего

интереса у граждан к реализации проектов экологической направленности.

Наиболее востребованными среди таких проектов являются проекты по обустройству и ремонту систем водоснабжения и водоотведения. Проекты по организации сбора твёрдых коммунальных отходов (ТКО) и проекты по обеспечению пожарной безопасности стали более популярными среди населения последние два года. Некоторый спад численности

проектов и участников инициативных групп объясняется увеличением объема средств софинансирования из федерального бюджета на проекты благоустройства. Фактически с помощью инструмента софинансирования государство подталкивает граждан к выбору тех проектов, которые могут получить больший объем бюджетных средств.

### Зарубежный опыт зелёного партисипаторного бюджетирования

В зарубежных странах активными темпами развивается практика партисипаторного бюджетирования, впервые реализованная в бразильском городе Порту-Алегри в 1989 г. Под партисипаторным бюджетированием (ПБ) понимается механизм, с помощью которого граждане принимают решение о распределении определённой части публичных бюджетов. К настоящему времени по всему миру насчитывается свыше 4 тыс. различных практик ПБ в 53 странах мира [16].

Зелёное партисипаторное бюджетирование – это разновидность ПБ, которая подразумевает вовлечение граждан в распределение публичных средств (расходов бюджетов) по направлениям экологии, охраны окружающей среды, устойчивого развития, климатической повестки [3]. Также к проектам зелёного ПБ могут быть отнесены другие проекты, реализованные с участием граждан, и лишь косвенно имеющие отношения к вышеперечисленным направлениям. Например, инициированное школьниками обустройство футбольного поля энергосберегающей системой освещения.

Активное развитие направление зелёного ПБ получило в Португалии, где реализуется национальная практика по вовлечению граждан в распределение средств публичных бюджетов. В столице страны реализуется общегородская программа ПБ Green PB Seal, в ходе которой жителям предоставляется возможность предложить и реализовать проект по одному из следующих направлений:

- смягчение последствий изменения климата (энергосбережение, установка солнечных батарей, сокращение объёмов производимого мусора, увеличение объёмов переработки отходов, развитие методов компостирования отходов);

- адаптация к изменениям климата (сокращение потребления воды, восстановление водного цикла, установка питьевых фонтанчиков, посадки деревьев, повышение

проницаемости и плодородия почвы, зелёные крыши);

- природа и биоразнообразие (создание/модернизация зелёных пространств, посадки деревьев, обустройство овощных плантаций);

- загрязнение воздуха, шум и устойчивая мобильность (продвижение использования городского транспорта, сокращение дорожного трафика, обустройство велосипедных парковок и дорожек, безопасность пешеходов).

Одним из первых реализованных проектов в рамках данной практики является предложенный гражданами проект по строительству «зелёного» коридора площадью 50 га и с сетью велосипедных и пешеходных трасс протяжённостью 40 км [17]. Коридор соединил две большие лесопарковые территории Лиссабона и позволил создать единую лесную экосистему в городе.

Также в рамках практики были реализованы проекты по обустройству сети велосипедных дорожек в нескольких районах города, по адаптации одного из городских парков к потребностям детей с ограниченными возможностями здоровья, инициатива по переобустройству стоянки для машин в небольшой публичный парк – проект, за который жители отдали рекордное число голосов (9477) за всю историю ПБ в городе.

В 2019 г. были начаты две пилотные практики школьного ПБ экологической направленности. Одна практика была реализована в школах Лиссабона, вторая – в школах г. Сегура-де-Молина в Испании. Были реализованы проекты по установке энергосберегающих систем освещения, проекты по вторичному использованию сточных вод в школах, проекты по установке зелёных уголков в каждом классе.

Уже на протяжении 6 лет на острове Мадейра в Португалии развивается уникальная практика по предотвращению пожаров и совместному с гражданами пожаротушению. На острове практически ежегодно возникают масштабные пожары, в том числе по причине человеческого фактора. Основой практики являются регулярные обучения жителей острова, в том числе детей, основам предотвращения пожаров и пожаротушения. Практика способствует развитию чувства гражданской ответственности и сопричастности к общей проблеме. В 2021 г. практика была удостоена премии Министерства чрезвычайных ситуаций Португалии как уникальный проект гражданского вовлечения [18].

### Примеры российских проектов инициативного бюджетирования экологической направленности

**Проект «Школа – территория заботы родного края», Республика Саха (Якутия).** Программа поддержки местных инициатив действует в Якутии с 2017 г. для решения наиболее важных проблем местного самоуправления. В рамках проекта ИБ «Школа – территория заботы родного края» по инициативе граждан была создана единая экологическая школа, которая работает на повышение экологической культуры и экологического сознания населения села Намцы Намского улуса. В рамках проекта организованы пункты по раздельному сбору мусора. Школа имеет 4 площадки, расположенные на территориях общеобразовательных школ улуса, где и проводятся образовательные мероприятия. Общая стоимость проекта составила 200 тыс. руб., из которых 120 тыс. руб. – средства софинансирования граждан.

**Проект «Чистое село», ХМАО.** Программа развития ИБ в ХМАО стартовала в 2017 г. Цель проекта «Чистое село» – ликвидация несанкционированных свалок на территории поселения, улучшение эстетического вида населённого пункта. В результате реализации проекта была проведена очистка территории от бытового мусора, установка контейнеров для складирования ТКО; установлено ограждение контейнерных площадок по периметру. Реализация проекта позволила организовать уборку бытового мусора на территории урочища Леушинка более 20 м<sup>3</sup>. Был сформирован эстетический облик урочища, повысилась привлекательность территории для гостей и жителей поселения.

**Проект «Приобретение модульного гаража из сэндвич-панелей для пожарной машины», Республика Башкортостан.** В 2016 г. по программе местных инициатив сельским поселением Ивано-Кувалатский сельсовет была приобретена пожарная машина, в 2018 г. – прицепная пожарная ёмкость. Однако, в зимнее время машина и ёмкость не могли быть заранее заправлены водой, так как не было тёплого помещения. В 2020 г. на территории села произошёл пожар частного дома. Так как машина не была наполнена водой, дом спасти не удалось. Граждане поселения выдвинули предложение о приобретении модульного гаража для пожарной машины. В результате собраний граждан и проведённого голосования был выбран проект по строительству тёплого гаража.

**Проект «Тушим пожар, зажигая сердца», Республика Башкортостан.** Проект был реализован в 2022 г. в сельском поселении Бахмутский сельсовет на юге Башкирии. В поселении живёт большое количество людей разных возрастов и национальностей. За последние годы повысилась пожароопасность в районе. Из-за большой засухи стали гореть леса и поля огромными площадями. Люди понимали, что находятся в опасности, и с имеющейся техникой, которая не подлежит восстановлению, им не справиться. Было принято решение о необходимости приобретения новой пожарной машины. Жители во главе с инициативной группой проводили собрания и обсуждения. Был собран денежный вклад граждан, предприниматели также финансово поучаствовали в проекте.

Своими силами жители также организовали пожарный бокс для хранения и обслуживания новой техники. Приобретённый автомобиль сразу же стал необходим, и был задействован в работе по устранению бедствия.

**Ремонт подъездной дороги к пруду, с. Старый Ирюк, Кировская область.** На территории села Старый Ирюк, где проживает 283 семьи, все естественные водоёмы (два пруда и река) не были оборудованы противопожарным пирсом. Отсутствовали оборудованные подъездные пути к естественному водоему. Наличие данных факторов в случае пожара отрицательно сказывалось бы на эффективности и качестве тушения пожара. Исходя из этого в 2019 г. жителями в рамках программы ИБ был выдвинут проект по ремонту подъездной дороги к пруду, после реализации которого значительно улучшилась потенциальная эффективность пожаротушения в поселении.

**Проект «Подземный дар», Самарская область.** На территории сельского поселения Михайло-Овсянка проживает более 700 человек. В летний период времени остро стоит вопрос о водоснабжении. Хорошей качественной воды для питья на территории поселения нет. На сходе граждан население выделило одну из наиболее важных проблем – сохранение и благоустройство общественных колодцев на территории поселения. По результатам реализации данного проекта ИБ было благоустроено 7 общественных колодцев на территории сельского поселения.

### Заключение

В настоящее время отсутствует единый информационный ресурс о проектах

с общественным участием, в том числе – экологических проектах. База данных Всероссийского конкурса проектов ИБ, которая содержит информацию о лучших проектах инициативного бюджетирования в России, могла бы стать таким информационным ресурсом и использоваться в научных и аналитических целях исследователями, экспертами и органами государственной власти.

Рост числа и стоимости экологических проектов ИБ подтверждает зарождение тренда по вовлечению жителей в экологическую повестку.

Благодаря инициативному бюджетированию появляются возможности для фокусирования внимания на проблематике экологической повестки. Проекты, инициированные гражданами, являются индикаторами реальных запросов, потребностей и проблем жителей.

## Литература

1. Вагин В.В., Шаповалова Н.А. Инициативное бюджетирование и смежные практики // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2016. № 38 (320) [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/initiativnoe-byudzhetrovanie-i-smezhnye-praktiki> (Дата обращения: 10.09.2023).
2. Вагин В.В., Паксиваткина В.А. Гражданские финансы // Финансовый журнал. 2023. Т. 15. № 1. С. 45–57.
3. Cabannes Y. Greening cities through Participatory Budgeting: Answers to climate change from Lisbon, Portugal and Molina de Segura, Spain // Lisbon: Camara Municipal de Lisboa; Zurich: City Finance Lab; Amsterdam: EIT Climate-KIC; Paris: FMDV; Barcelona: IOPD; Zurich: South Pole. 2021 [Электронный ресурс] <https://www.oidp.net/docs/repo/doc1009.pdf> (Дата обращения: 10.09.2023).
4. Cabannes Y. Contributions of participatory budgeting to climate change adaptation and mitigation: current local practices across the world and lessons from the field // Environment and Urbanization. 2021. V. 33. No. 2. P. 356–375.
5. Платформа партисипаторного бюджетирования Лиссабона [Электронный ресурс] <https://or.lisboaparticipa.pt> (Дата обращения: 10.09.2023).
6. Виноградова Т.И. Партисипаторное бюджетирование как инструмент, способствующий достижению целей устойчивого развития // Финансовый журнал. 2021. Т. 13. № 2. С. 46–60.
7. Cabannes Y. Participatory Budgeting: a powerful and expanding contribution to the achievement of SDGs and primarily SDG 16.7 [Электронный ресурс] [https://www.gold.uclg.org/sites/default/files/02\\_policy\\_series-v3.pdf](https://www.gold.uclg.org/sites/default/files/02_policy_series-v3.pdf) (Дата обращения: 10.09.2023).
8. Портал МоиФинансы.рф, раздел Инициативное бюджетирование [Электронный ресурс] <https://моифи-нансы.рф/project/initiativnoe-byudzhetrovanie/> (Дата обращения: 10.09.2023).
9. Официальный сайт Единого фонда поддержки и развития экологических инициатив Компас [Электронный ресурс] <https://www.eco-compass.ru/предложить-инициативу/> (Дата обращения: 10.09.2023).
10. Вагин В.В., Шаповалова Н.А., Гаврилова Н.В. Мониторинг развития инициативного бюджетирования: методика и практика организации // Финансовый журнал. 2019. № 2. С. 51–64.
11. Доклад о лучших практиках развития инициативного бюджетирования в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях. Минфин России. 2023 [Электронный ресурс] [https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2023/09/main/0609\\_Doklad\\_2023\\_.pdf](https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2023/09/main/0609_Doklad_2023_.pdf) (Дата обращения: 10.09.2023).
12. Доклад о лучших практиках развития инициативного бюджетирования в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях 2019 года [Электронный ресурс] [https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad\\_IB\\_2018.pdf](https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad_IB_2018.pdf) (Дата обращения: 10.09.2023).
13. Доклад о лучших практиках развития инициативного бюджетирования в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях 2020 года [Электронный ресурс] [https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad\\_IB\\_2019.pdf](https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad_IB_2019.pdf) (Дата обращения: 10.09.2023).
14. Доклад о лучших практиках развития инициативного бюджетирования в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях 2021 года [Электронный ресурс] [https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/Doklad\\_o\\_luchshikh\\_praktikakh\\_initiativnogo\\_budzhetrovaniya\\_2021.pdf](https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/Doklad_o_luchshikh_praktikakh_initiativnogo_budzhetrovaniya_2021.pdf) (Дата обращения: 10.09.2023).
15. Доклад о лучших практиках развития инициативного бюджетирования в субъектах Российской Федерации и муниципальных образованиях 2022 года [Электронный ресурс] [https://minfin.gov.ru/ru/document/?id\\_4=300374](https://minfin.gov.ru/ru/document/?id_4=300374) (Дата обращения: 10.09.2023).
16. Nelson D., Sahsil E., Rafaela C., Simone J., Tatiane S. Participatory Budgeting World Atlas 2020-2021, Europeia and Oficina, Portugal, 2021 [Электронный ресурс] <https://www.oficina.org.pt/publicacoes.html> (Дата обращения: 10.09.2023).
17. Официальный сайт Администрации Лиссабона (Португалия) [Электронный ресурс] <https://cidadania.lisboa.pt> (Дата обращения: 10.09.2023).
18. Презентация выступления Домингуша Родригеса, профессора Университета Мадейра (Португалия) «Потенциал гражданского участия, роль школьного инициативного бюджетирования и общественная гражданская наука» на Северной школе консультантов инициативного бюджетирования в Ханты-Мансийске, 2021 год [Электронный ресурс] <https://winterschoolib.muopenugra.ru/materials/168909/> (Дата обращения: 10.09.2023).

19. Кантор Г.Я., Сырчина Н.В., Ашихмина Т.Я. Моделирование углеродного баланса полигонов твёрдых коммунальных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 198–204.

20. Домрачев Д.Г., Кирилловых А.А. Правовой режим ограничения выбросов парниковых газов как инструмент защиты климата // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 1. С. 191–197.

## References

1. Vagin V.V., Shapovalova N.A. Initiative budgeting and related practices // Financial analytics: problems and solutions. 2016. No. 38 (320) [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/initsiativnoe-byudzhetrovanie-i-smezhnye-praktiki> (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

2. Vagin V.V., Paksivatkina V.A. Civil finance // Financial Journal. 2023. V. 15. No. 1. P. 45–57 (in Russian). doi: 10.31107/2075-1990-2023-1-45-57

3. Cabannes Y. Greening cities through Participatory Budgeting: Answers to climate change from Lisbon, Portugal and Molina de Segura, Spain // Lisbon: Camara Municipal de Lisboa; Zurich: City Finance Lab; Amsterdam: EIT Climate-KIC; Paris: FMDV; Barcelona: IOPD; Zurich: South Pole. 2021 [Internet resource] <https://www.oidp.net/docs/repo/doc1009.pdf> (Accessed: 10.09.2023).

4. Cabannes Y. Contributions of participatory budgeting to climate change adaptation and mitigation: current local practices across the world and lessons from the field // Environment and Urbanization. 2021. V. 33. No. 2. P. 356–375. doi: 10.1177/095624782

5. Lisbon Participatory Budgeting Platform [Internet resource] <https://op.lisboaparticipa.pt> (Accessed: 10.09.2023).

6. Vinogradova T.I. Participatory budgeting as a tool contributing to the achievement of the sustainable development goals // Financial Journal. 2021. V. 13. No. 2. P. 46–60 (in Russian). doi: 10.31107/2075-1990-2021-2-46-60

7. Cabannes Y. Participatory Budgeting: a powerful and expanding contribution to the achievement of SDGs and primarily SDG 16.7 [Internet resource] [https://www.gold.uclg.org/sites/default/files/02\\_policy\\_series-v3.pdf](https://www.gold.uclg.org/sites/default/files/02_policy_series-v3.pdf) (Accessed: 10.09.2023).

8. Portal MyFinance.rf, section Initiative budgeting [Internet resource] <https://мойфинансы.рф/project/initsiativnoe-byudzhetrovanie/> (Accessed: 10.09.2023).

9. Official website of the Unified Fund for the Support and Development of Environmental Initiatives Compass [Internet resource] <https://www.eco-compass.ru/offer-initiative/> (Accessed: 10.09.2023).

10. Vagin V.V., Shapovalova N.A., Gavrilova N.V. The monitoring of development initiative budgeting in Russia's Regions: Methodology and practice of organization // Finansovyy zhurnal – Financial Journal. 2019. No. 2. P. 51–64 (in Russian). doi: 10.31107/2075-1990-2019-2-51-64

11. Report on the best practices for the development of initiative budgeting in the constituent entities

of the Russian Federation and municipalities. Ministry of Finance of Russia. 2023 [Internet resource] [https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2023/09/main/0609\\_Doklad\\_2023\\_.pdf](https://minfin.gov.ru/common/upload/library/2023/09/main/0609_Doklad_2023_.pdf) (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

12. Report on the best practices for the development of initiative budgeting in the constituent entities of the Russian Federation and municipalities. Ministry of Finance of Russia. 2019 [Internet resource] [https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad\\_IB\\_2018.pdf](https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad_IB_2018.pdf) (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

13. Report on the best practices for the development of initiative budgeting in the constituent entities of the Russian Federation and municipalities. Ministry of Finance of Russia. 2020 [Internet resource] [https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad\\_IB\\_2019.pdf](https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/doklad_IB_2019.pdf) (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

14. Report on the best practices for the development of initiative budgeting in the constituent entities of the Russian Federation and municipalities. Ministry of Finance of Russia. 2021 [Internet resource] [https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/Doklad\\_o\\_luchshikh\\_praktikakh\\_initsiativnogo\\_budzhetrovaniya\\_2021.pdf](https://www.nifi.ru/images/FILES/IB/Doklad_o_luchshikh_praktikakh_initsiativnogo_budzhetrovaniya_2021.pdf) (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

15. Report on the best practices for the development of initiative budgeting in the constituent entities of the Russian Federation and municipalities. Ministry of Finance of Russia. 2022 [Internet resource] [https://minfin.gov.ru/ru/document/?id\\_4=300374](https://minfin.gov.ru/ru/document/?id_4=300374) (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

16. Nelson D., Sahsil E., Rafaela C., Simone J., Tatiane S. Participatory Budgeting World Atlas 2020-2021, Epopeia and Oficina, Portugal, 2021 [Internet resource] <https://www.oficina.org.pt/publicacoes.html> (Accessed: 10.09.2023).

17. Official website of the Administration of Lisbon (Portugal) [Internet resource] <https://cidadania.lisboa.pt> (Accessed: 10.09.2023).

18. Presentation by Domingos Rodriguez, professor of the University of Madeira (Portugal) “The potential for civic participation, the role of school initiative budgeting and social citizenship science” at the Northern School of Initiative Budgeting Consultants in Khanty-Mansiysk, 2021 [Internet resource] <https://winterschoolib.myopenugra.ru/materials/168909/> (Accessed: 10.09.2023) (in Russian).

19. Kantor G.Ya., Syrchina N.V., Ashikhmina T.Ya. Modeling carbon balance of municipal solid waste landfills // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 198–204 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-198-204

20. Domrachev D.G., Kirillovyh A.A. The legal regime for limiting greenhouse gas emissions as a climate protection tool // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 1. P. 191–197 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-191-197

## Environmental safety through the prism of legal regulation of renewable energy in Russia

© 2023. E. S. Kosheeva<sup>1</sup> ORCID: 0000-0003-0272-7759<sup>†</sup>

M. A. Smirnov<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0002-2876-1974<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Volgo-Vyatka Institute (branch)  
of the Kutafin Moscow State Law University (MSAL),  
30, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: kosheeva@yandex.ru, vkkop@yandex.ru

The article is devoted to an urgent problem in the field of environmental safety – the legal regulation of renewable energy in Russia at the level of federal legislation, as well as trends in the field of program normative regulation in the context of long-term planning until 2050. The method of special normative regulation in the field of renewable energy chosen by the legislator is determined by the directions of state regulation in the area under consideration. The basis for long-term programmatic legal regulation is the combination of traditional and renewable energy, which is necessary for the country's energy security. On the other hand, a serious problem of legal regulation has been identified: at the level of federal legislation, there is a legal gap in the issue of the relationship between the concepts of “energy resource” and “non-renewable energy sources”, which is the reason for finalizing the current legislation. The result of the study is recommendations to reflect in the legal regulation of renewable energy, which is programmatic and long-term in nature, not the principle of priority of renewable energy sources (RES), but the principle of combining traditional and renewable energy and its development, taking into account the interests of the country's energy security. Thus, the actual preservation of the priority of traditional energy and the development of energy based on renewable energy sources within the framework of regulatory long-term planning based on state support determine the main direction of developing the country's environmental safety system for the coming decades.

**Keywords:** renewable energy, regulation, long-term development of RES, energy security.

УДК 349

## Экологическая безопасность через призму правового регулирувания возобновляемой энергетики в России

© 2023. Е. С. Кошечева<sup>1</sup>, к. ю. н., доцент, зав. кафедрой,  
М. А. Смирнов<sup>1,2</sup>, к. и. н., доцент,

<sup>1</sup>Волго-Вятский институт (филиал) Московского государственного юридического университета имени О. Е. Кутафина (МГЮА),  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 30,  
<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: kosheeva@yandex.ru, vkkop@yandex.ru

Статья посвящена актуальной проблеме в сфере экологической безопасности – правовому регулированию возобновляемой энергетики в России на уровне федерального законодательства, а также тенденциям в сфере программного нормативного регулирования в контексте долгосрочного планирования до 2050 г. Выбранный законодателем способ специального нормативного регулирования в сфере возобновляемой энергетики обусловлен направлениями государственного регулирования в рассматриваемой сфере. Основой долгосрочного программного правового регулирования выступает сочетание традиционной и возобновляемой энергетики, что необходимо для энергетической безопасности страны. С другой стороны, выявлена серьезная проблема правового регулирования: на уровне федерального законодательства наличие правового пробела в вопросе соотношения понятий «энергетический ресурс» и «невозобновляемые источники энергии», что является поводом для доработки действующего законодательства. Результатом исследования являются рекомендации об отражении в правовом

регулировании возобновляемой энергетики, которое носит программный и долгосрочный характер, не принципа приоритета возобновляемых источников энергии, а принципа сочетания традиционной и возобновляемой энергетики и её развития с учётом интересов энергетической безопасности страны. Таким образом, фактическое сохранение приоритета традиционной энергетики и развитие энергетики на основе возобновляемых источников энергии в рамках нормативного долгосрочного планирования на основе государственной поддержки определяют основное направление разработки системы экологической безопасности страны на ближайшие десятилетия.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, нормативное регулирование, долгосрочное развитие, возобновляемые источники энергии, энергетическая безопасность.

The relevance of the research topic is due, first of all, to the fact that renewable energy is “the fastest growing sector of the world energy sector: in 2014, RES accounted for 59% of the increase in global generating capacity, and the share of global electricity generation from RES exceeded 22.8%” [1]. Moreover, “over the past 10 years, investment in new renewable energy capacity (not including large hydropower generation) has increased 7-fold: from 40 billion in 2004 to 270 billion dollars in 2014” [2]. However, so far the development of renewable energy sources, as a rule, “is only possible with one or another form of state support” [1].

Legislative regulation of the sphere of “green” energy in the Russian Federation is in the process of formation. At the same time, public relations in the field of renewable energy are characterized, as a rule, by a wide range of regulations, the peculiarity of which consists in a multi-level and programmatic nature.

The purpose of this study is to identify environmental safety problems in the context of legal regulation in the field of renewable energy in the Russian Federation, analyze trends in legal regulation in this area and their legal assessment.

Scientists have repeatedly addressed the problem of legal regulation of renewable energy in their works [3–6]. However, changes in the socio-political situation in the world force us to revisit this problem, taking into account the emerging aspects that need to be studied.

### Objects and methods of research

The object of the study is public relations in the field of development of renewable energy in the Russian Federation, arising in the process of developing and implementing measures of state support for renewable energy sources, which are regulated by normative acts, including strategic planning program documents.

The subject of the study was a set of legal norms in the field of development of renewable energy in the Russian Federation. At the same time, the authors identified gaps in the legal

regulation of the “green” energy sector based on an analysis of current legislation, as well as long-term planning documents until 2050. The methodological research tools include general scientific methods, such as dialectical and logical, as well as special scientific methods: legal interpretation, system-structural and comparative legal methods. When writing the article, in order to select material for analyzing the state of legal regulation of environmental safety in the light of the development of renewable energy, the authors used the ConsultantPlus Legal Reference System, as well as the search engines of the Google scholar, Social Science Research Network, Scopus, Web of Science databases. The study covers the period from 1998 to the present time.

### The problem of regulatory regulation of the renewable “green” energy sector in Russia

The main problem that gives rise to shortcomings in legal regulation in the field of green energy development is that the Russian Federation is one of the countries that are the world leaders in traditional energy. This means that it is the state that needs to recognize the priority in the development of renewable energy sources and take special measures of state support for this area.

When analyzing the directions and measures of state support for the energy sector in question in both countries, it is important to implement the sustainable development goals for the period up to 2030, formulated in Resolution 70/1, adopted by the General Assembly on September 25, 2015, “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development” (hereinafter referred to as SDGs), which “are a key part of a large system of targets and indicators primarily for the developing world” [7]. In this regard, the analysis of long-term development strategies of Russia and Canada towards the development of renewable energy sources, as well as government policy measures, is also relevant within the framework of the designated research topic.

Almost 45 years ago, in resolution No. 33/148, the UN General Assembly first formulated and consolidated the concept of “new and renewable energy sources”. In accordance with this resolution, “non-traditional and renewable energy sources include: solar energy; geothermal energy; wind energy; light energy; energy of ebbs and flows; energy of waves and thermal gradient of the sea; biomass conversion energy; energy obtained by burning fuel wood, charcoal, peat, oil shale, tar sands; energy from the use of draft animals and hydropower”.

The definition of the category “renewable energy”, formulated on the official UN website, is as follows: “it is energy obtained from natural sources that are replenished at a rate exceeding the rate of its consumption.” It actually coincides with the doctrinal definition formulated back in 1986, where energy based on renewable energy sources is “energy obtained from constant (continuous) or renewable energy flows circulating in the natural environment” [8].

At the same time, the basic conceptual apparatus associated with defining the definition of “renewable energy sources” is very broad and is closely related to the definition of the categories “energy” and “energy source”, “energy resource”.

In Russian legislation, the formulation of the content of the category “renewable energy sources (RES)” was proposed in 1998 in bill No. 98033104-2 [9]. The category “non-traditional renewable energy sources” as “energy from the sun, wind, earth’s heat, natural temperature gradients, natural movement of water flows, biomass” was also designated in the said bill.

Currently, the legislator also actually identifies the concepts of “renewable energy” and “renewable energy sources”. This conclusion is confirmed by a detailed definition, which is formulated in Article 3 of the Federal Law of March 26, 2003 No. 35-FL “On Electric Power Industry”. In accordance with this norm, the concept of “renewable energy sources” is completely identified with the concept of “energy” and is disclosed in the law.

It should be noted that the term “renewable energy source” is used in a number of regulations at the federal level: Decree of the Government of the Russian Federation dated June 3, 2008 No. 426 “On the qualification of a generating facility operating on the basis of the use of renewable energy sources”; Decree of the Government of the Russian Federation dated January 8, 2009 No. 1-r “On the main directions of state policy in the field of increasing energy efficiency of

the electric power industry based on the use of renewable energy sources for the period until 2035”; Decree of the Government of the Russian Federation dated August 29, 2020 No. 1298 “On issues of promoting the use of renewable energy sources, amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation and on the recognition as invalid of certain provisions of certain acts of the Government of the Russian Federation”.

It should also be noted that there is legislative regulation of the area under consideration at the level of individual constituent entities of the Russian Federation. In particular, these include the Law of the Republic of Sakha (Yakutia) “On Renewable Energy Sources of the Republic of Sakha (Yakutia)” No. 1380-Z No. 313-V dated November 27, 2014, where the concept of a renewable energy source is formulated similarly to federal legislation through the category “energy”.

The Russian legislator also uses the concept of “energy resource” widely, but not in relation to the regulation of relations in the field of renewable energy. Thus, there is some uncertainty regarding the relationship between the categories “renewable energy source” and “energy resource”. Let us dwell in more detail on the analysis of the legislative recognition of the category “energy resource”.

In accordance with Article 2 of the Federal Law of November 23, 2009 No. 261-FL “On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation,” an energy resource is understood as “an energy carrier, the energy of which is used or can be used in carrying out economic and other activities, as well as the type of energy (nuclear, thermal, electrical, electromagnetic energy or other type of energy)”.

Consequently, a literal interpretation of the norm allows us to conclude that it is possible to consider the category “renewable energy sources” as a type of energy resource. At the same time, the lack of a normatively established connection between these concepts is a certain legal gap. This conclusion is confirmed by the conclusion of the Legal Department on bill No. 98033104-2 [10], which contains the following remark: “In paragraph five it is proposed to use the concept of “energy resources”. At the same time, it is not clear how this concept relates to the concept of “non-renewable energy sources” contained in Article 1 of the Law. The lack of a clear understanding of the category “energy resource” in law is also indicated by individual scientific studies [11].

We believe that the absence of this relationship is caused by the use of the term “energy resource” in the field of traditional energy, which does not exclude the possibility of systematically finalizing legislation in this direction in the development of renewable energy in the future.

### Program normative regulation of “green” energy in Russia

In accordance with the provisions of the Energy Strategy of the Russian Federation for the period until 2035, approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated June 9, 2020 No. 1523-r [12] (hereinafter referred to as the Energy Strategy), it is noted that in the Russian Federation a third of generation in fuel-energy complex consists of nuclear energy, hydropower and other renewable energy sources (hereinafter referred to as RES), which determines the place of our state among the largest economies in the world as one of the most environmentally friendly (low-carbon) fuel and energy balances.

Article 3 of the Federal Law of June 26, 2003 No. 35-FL “On Electric Power Industry” defines the list related to renewable energy sources.

Additional normative regulation is established depending on the relevant source and energy sector. It should be noted that it is not the content of the category “RES” that is determined on the basis of a set of characteristics, but by listing sources.

The basis of this approach, according to the author, is the presence of developed standards in the energy sector and insufficient development in the field of energy law doctrine. Thus, the development of solar energy in Russia is at an early stage. Specifically, at the end of 2019, solar power generated “2.8% of total global electricity production” [13]. **At the same time, at the beginning of 2020 in Russia, solar and wind generation “together accounted for 0.2% of electricity production” [13].** The bulk of the power plants were put into operation in 2019–2020, currently “about 50 companies that supply equipment and carry out installation” [13]. The main trend in the development of solar energy is microgeneration, i.e. the installation of solar panels by private entities for domestic consumption. In this regard, the main regulatory act was the Federal Law of December 27, 2019 No. 471-FL, adopted in 2019, “On amendments to the Federal Law “On Electric Power Industry” regarding the development of microgeneration,” which actually began to be applied in 2021 in connec-

tion with adoption of Decree of the Government of the Russian Federation dated 03/02/2021 No. 299 “On introducing amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation in terms of determining the features of the legal regulation of relations regarding the functioning of microgeneration facilities”.

With regard to wind energy as a source of renewable energy, it should also be noted that it has no actual role in the country’s energy balance, and the Russian market is not included in the list of leading wind energy markets [14]. In the power structure of UES of Russia power plants, according to data at the beginning of 2022, “wind energy occupies 0.79%” [15]. In the structure of electricity generation (electricity export) in the Unified Energy System of Russia for the same period, “the share of wind power plants is 0.32%” [15]. By comparison, of global electricity production in 2021, according to the Global Electricity Review, wind power “accounted for 6.6%” [15]. Regulatory regulation is carried out within the framework of general legislative acts, there is no special regulation.

Hydropower provides almost 19% of electricity generation in Russia [16]. **So far, strategic documents assume a slight decrease in the growth rate of the industry in the period until 2035.** The list of regulations governing the area under consideration is very wide: from the Water Code of the Russian Federation to standards in the field of use of hydraulic structures.

Geothermal energy is the second most common form of renewable energy in Russia, but it accounts for less than 1% of total energy production. The most accessible geothermal potential is concentrated in Kamchatka and the Kuril Islands. Legal regulation is carried out within the framework of federal legislation in the field of electric power industry.

Bioenergy in Russia is widespread in the field of heat supply and is carried out on the basis of federal regulation by general regulations.

Thus, special normative regulation of individual sources of renewable energy is not typical for Russia; it is carried out on the basis of federal legislation in the field of energy.

The fundamental regulations in the field of use of renewable energy sources are the range of by-laws that define: directions of state policy in the field of increasing the energy efficiency of the electric power industry based on renewable energy sources for the period until 2035 (Order of the Government of the Russian Federation dated March 24, 2022 No. 594-r “On approval changes that are being made to the Main Direc-

tions of State Policy in the field of increasing energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources for the period until 2035”, approved by order of the Government of the Russian Federation of January 8, 2009 No. 1-r); regime of generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources (Resolution of the Government of the Russian Federation dated June 3, 2008 No. 426 “On the qualifications of a generating facility operating on the basis of the use of renewable energy sources”); the procedure for their certification (Resolution of the Government of the Russian Federation dated February 17, 2014 No. 117 “On some issues related to the certification of volumes of electrical energy produced at qualified generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources”).

They also include a number of strategic planning program documents in the field of long-term development of the electric power industry (Resolution of the Government of the Russian Federation dated October 17, 2009 No. 823 “On schemes and programs for the long-term development of the electric power industry” is valid until January 1, 2024); as well as the procedure for their development, approved by Decree of the Government of the Russian Federation of December 30, 2022 No. 2556 “On approval of the Rules for the development and approval of documents for the long-term development of the electric power industry, amendments and invalidation of certain acts and certain provisions of certain acts of the Government of the Russian Federation”. Thus, the main direction of normative regulation in the field of use of renewable energy sources is the establishment of a legal regime for generating facilities, which makes it possible for state financial support.

### **Long-term strategies for energy development based on renewable energy sources**

In accordance with the Federal Law “On Strategic Planning in the Russian Federation” dated June 28, 2014 No. 172-FL, the strategy for the socio-economic development of the Russian Federation is understood as “a strategic planning document containing a system of long-term priorities, goals and objectives of public administration aimed at ensuring sustainable and balanced socio-economic development of the Russian Federation”.

One of the key areas that determine the basis for long-term planning in the field of energy de-

velopment based on renewable energy sources is the “transition to technologies using solar, wind, water energy (including wastewater energy), biomass, biogas, geothermal energy (hereinafter referred to as renewable energy sources), as well as the development of nuclear and hydrogen energy technologies” [18].

Currently, there is a long-term development strategy in this direction until 2050 [18]. In accordance with the provisions of the Strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050, Russia’s global energy transition according to the target (intensive) scenario involves “a significant increase in generation based on renewable energy sources”, “the emergence and development of new industries (including hydrogen energy and electric transport)”.

Also, direct development planning is defined in the Energy Strategy of Russia for the period until 2035 [12]. The implementation of the action plan of this strategy is carried out in two main stages: Stage I – until 2024, Stage II – 2025–2035.

The fundamental change in the foreign economic situation put on the agenda the issue of prompt updating of the Energy Strategy of Russia [18]. Following the meeting, the President of the Russian Federation gave instructions to “extend the planning horizon until 2050” [19]. However, these adjustments will affect the traditional energy sector.

Of course, hydrocarbons are currently the key energy source, and the idea of “new” hydrocarbon sources is also developing. Russia has as a strategic goal the development of hydrogen energy, for which the corresponding concept [20] has been approved.

The main areas of long-term planning in the field of renewable green energy include the following:

Firstly, the main support instrument on the wholesale market is the RES CSA program [21] (the capacity supply agreements provided by qualified generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources).

The key objectives are: development of solar and wind energy technologies, localization of component production and creation of a domestic market for renewable energy sources [22].

The implementation of long-term strategic planning in the wholesale renewable energy market is the RES 2.0 CSA program, which represents the second stage of the development of “green” energy in Russia, designed for 2025–2035. This program is aimed not only at the

construction of new generation facilities based on renewable energy sources (RES), but also at increasing their efficiency and stimulating the production and export of Russian equipment [23]. However, due to the geopolitical situation, sanctions measures of unfriendly states and the resulting crisis phenomena in 2022, the selection of projects was postponed to May 2023 on the basis of Decree of the Government of the Russian Federation dated 01.06.2022 No. 999 “On amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the issues of conducting competitive selection of investment projects for the construction of generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources, on the wholesale and retail markets of electric energy and on the establishment of certain features of state regulation of prices (tariffs) in the electric power industry in 2022 and 2023”.

Secondly, the main instrument of support on the retail market is the establishment of a long-term tariff based on the Decree of the Government of the Russian Federation of January 23, 2015 No. 47 “On amendments to certain acts of the Government of the Russian Federation on the issues of promoting the use of renewable energy sources in retail electricity markets”.

Thirdly, the development of microgeneration based on renewable energy sources.

Fourthly, the development of renewable energy sources in isolated areas.

The main measures for the implementation of state policy in the field of renewable energy development until 2035 are the following.

Firstly, the construction of renewable energy power plants operating on the wholesale and retail markets of electrical energy. Thus, in the field of solar energy development, active construction of solar power plants (SPP) [24] is underway; as part of the first stage of implementation of the Energy Strategy of Russia, all SPPs [25] were put into operation. In 2022, the following renewable energy generation facilities were commissioned: Kola wind farm 170.4 MW (Murmansk region), Berestovskaya wind farm 60 MW (Stavropol Territory), Krasnogorsk small hydroelectric power station 2 – 24.9 MW (Karachay-Cherkess Republic), ASUE in the village Toora-Khem 1.0 MW (Republic of Tyva) [25]. As of 01/01/2023, within the framework of the RES CSA 1.0, 4002.1 MW of RES generation facilities were put into operation: SPP – 1788.3 MW (70 power plants); WPP – 2168.1 MW (24 power plants); mHPP – 45.8 MW (4 power plants) [25].

Secondly, the construction of renewable energy power plants operating in technologically isolated and hard-to-reach areas (ТИНА) [26]. On the territory of Russia there are a large number of TIHAs that are not covered by a centralized power supply. Most of them fall on the territory of the Far East and regions of the Far North and territories equivalent to it: certain regions of the Republics of Sakha (Yakutia) and Karelia, Murmansk, Arkhangelsk, Magadan, Amur and Sakhalin regions, Kamchatka Territory, Chukotka Autonomous Okrug, Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. These territories are characterized by harsh climatic conditions (the heating season lasts from 250 to 340 days) and relatively low population density. According to various estimates, from 11 to 20 million citizens of the Russian Federation live in isolated territories. Digitalization and decentralization trends determine the transition from the construction of large power plants to the creation of a distributed generation system, as well as the replacement of inefficient diesel electricity generation in remote and hard-to-reach areas [27] with generation based on liquefied natural gas, renewable energy sources by order of the Government of the Russian Federation dated 08/15/2019 No. 7456p-P9. In the renewable energy industry, we are mainly talking about wind and solar energy generation [28].

Thirdly, the development of the micro-generation market based on renewable energy sources. In Russia, the idea of stimulating microgeneration using renewable energy sources at the state level was developed at the end of 2016 as part of the implementation of the country’s environmentally sustainable development strategy [29]. As part of the Energy Strategy, support is provided for projects related to the construction and commissioning of microgeneration facilities. At the same time, in 2022, there was a decline on the microgeneration market based on renewable energy sources in Russia, including facilities used by consumers to produce electricity to satisfy their own household and (or) industrial needs without supplying electricity to the network by up to 50% [30].

According to A. Maksimov [23], the implementation of measures of the RES 2.0 CSA program will make the renewable energy sector competitive on the Russian and global markets, and will also allow the export of equipment for energy generation based on renewable energy sources.

At the same time, some scientists believe that “active international cooperation in the

field of ecology ensured the positioning of renewable energy sources as one of the main tools for combating negative climate change, which also became the most important factor in their popularization, but not in their practical implementation” [31].

Currently, the assessment of scientists in determining a clear direction of state policy in the field of renewable “green” energy in Russia is contradictory.

On the one hand, the “energy transition” will not only lead to the loss of traditional sales markets and income, but may also “force a costly and technologically complex decarbonization of the energy sector, including in order to avoid possible trade barriers of importing countries” [30]; on the other hand, “the economic efficiency of renewable generation will lead to the formation of an innovative energy paradigm” [32].

### Conclusion

In modern conditions, government regulation in Russia should be based on the principle of a balance of renewable and non-renewable energy. This conclusion is supported by the following provisions:

1) in accordance with the SDGs, the creation of an area of investment and institutional attractiveness for intensifying the use of renewable energy sources entails “the need for state support both for the creation of primary infrastructure and production in the field of renewable energy sources”;

2) the dominance of traditional energy and its main priority presupposes “the need for targeted stimulation of renewable energy sources as a way to regulate the balance of renewable and non-renewable energy”;

3) the balanced development of renewable and non-renewable energy in the context of the transition to a low-carbon economy is aimed at strengthening the energy security of the Russian Federation.

So, the main directions of Russian state policy in the field of renewable energy sources are defined at the level of two key regulations: the Energy Strategy of the Russian Federation and the Main Directions of State Policy in the field of increasing the energy efficiency of the electric power industry based on the use of renewable energy sources (RES) until 2035.

At the same time, the mandatory purchase of electrical energy generated by renewable energy generating facilities, as a priority, forms the basis of the mechanism of state support for renewable energy sources, which is enshrined in

the Federal Law “On Electric Power Industry” dated March 26, 2003 No. 35-FL.

The main measures of state support in the context of long-term planning in the field of energy development based on renewable energy sources in Russia are:

– on the wholesale market – the RES CSA program (agreements on the provision of power by qualified generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources);

– on the retail market – establishing a long-term tariff for generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources;

– in the direction of development of renewable energy infrastructure – investment support for projects regarding the construction and commissioning of microgeneration facilities, as well as the creation of a distributed generation system in remote and hard-to-reach areas.

In the next 30 years, state regulation of renewable energy sources in Russia will be based on the principle of a balance of renewable and non-renewable energy, which will ensure the strengthening of Russia's energy security. At the same time, the actual preservation of the priority of traditional energy determines the main direction of development of the country's environmental safety system for the coming decades. This is also the most environmentally friendly approach in the context of existing developments and directions of development of large participants in the field of traditional energy.

### References

1. Grechukhina I.A. Economic mechanisms of renewable energy development: avtoref. diss. na... kand.ekon.nauk. Moskva, 2016. 26 p. (in Russian).
2. Grechukhina I.A., Kiryushin P.A. Renewable energy sources as a factor of renewable energy // Internet-zhurnal NAUKOVEDENIE. Noyabr-dekabr 2015. V. 7. No. 6 [Internet recourse] <https://cyberleninka.ru/article/n/vozobnovly-aemye-istochniki-energii-kak-faktor-transformatsii-globalnoy-energetiki/viewer> (Accessed: 25.10.2023) (in Russian).
3. Ignaleva I.A. Placement of energy facilities on lands and land plots without their provision and establishment of easements, public easements: problems of legal regulation and enforcement // Laws of Russia: experience, analysis, practice. 2023. No. 2. P. 14–21 (in Russian).
4. Kologermanskaya C.M. Features of contractual regulation of relations in the use of renewable energy sources // Courier of Kutafin Moscow State Law University (MSAL). 2020. No. 3. P. 174–178 (in Russian).
5. Popondopulo V.F., Gorodov O.A., Petrov D.A. Renewable energy sources in the electric power industry // Energeticheskoe pravo. 2011. No. 1. P. 23–29 (in Russian).

6. Kuzmin A.V., Poloskova E.Y., Raspopov O.M., Kuzmina L.I., Goncharova O.A. The state of pine stand under the distributed influence of precipitations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2008. No. 2. P. 74–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2008-2-074-79

7. Report on human development in the Russian Federation for 2016 / Eds. S.N. Bobylev, L.M. Grigoriev. Moskva: Analytical Center under the Government of the Russian Federation, 2016. 298 p.

8. Twidell J., Weir T. Renewable energy resources. London: Routledge, 2015. 816 p. doi: 10.4324/9781315766416

9. Draft federal law No. 98033104-2 of 04/16/1998 “On state policy in the field of use of non-traditional renewable energy sources” [Internet resource] [https://sozd.duma.gov.ru/bill/98033104-2#bh\\_histras](https://sozd.duma.gov.ru/bill/98033104-2#bh_histras) (Accessed: 25.10.2023) (in Russian).

10. Conclusion on the text of the Federal Law “On State Policy in the Sphere of the Use of Non-Traditional Renewable Energy Sources” (as amended, proposed by the Conciliation Commission) and the draft resolution of the State Duma “On the re-examination of the Federal Law “On State Policy in the Sphere of the Use of Non-Traditional Renewable Energy Sources” dated 22.10.1999 [Internet resource] [https://sozd.duma.gov.ru/bill/98033104-2#bh\\_histras](https://sozd.duma.gov.ru/bill/98033104-2#bh_histras) (Accessed: 25.10.2023) (in Russian).

11. Vinokurova A.E. Understanding and correlation of the terms “energy resources”, “natural resources”, “mineral resources” and “minerals” in national and foreign law // *Nauchnoe obozrenie. Seriya 1: Ekonomika i pravo*. 2020. No. 1–2. P. 261–273 (in Russian).

12. The energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035, approved by decree of the government of the Russian Federation No. 1523-r dated June 9, 2020 [Internet resource] <https://minenergo.gov.ru/node/1026?ysclid=lepkrof9at12687539> (Accessed: 25.10.2023) (in Russian).

13. Unsubsidized solar energy market in Russia: in anticipation of explosive growth. Moskva: Association “Goal Number Seven”, 2021 [Internet resource] <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/50a/50a6a3fa1ebbe63c01344552b77f7d90.pdf?ysclid=lc14tx06oj811659452> (Accessed: 25.10.2023) (in Russian).

14. Gzenger Sh., Denisov R.S., Elistratov V.V. Wind power in Russia: opportunities, barriers and development prospects // *Scientific and technical statements of SPBU. Natural and engineering sciences*. 2017. V. 23. No. 2. P. 17–27 (in Russian).

15. “Wind, wind! You are powerful” [Internet resource] [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/issue/2022/7/1039/?ysclid=lc156kuf9s495350240](https://www.cdu.ru/tek_russia/issue/2022/7/1039/?ysclid=lc156kuf9s495350240) (Accessed: 16.10.2023) (in Russian).

16. Analytical review “Hydropower in Russia and foreign countries” 2022 [Internet resource] [http://hydropower.ru/news/detail.php?ELEMENT\\_ID=11046&ysclid=lc16ol7jft181550567](http://hydropower.ru/news/detail.php?ELEMENT_ID=11046&ysclid=lc16ol7jft181550567) (Accessed: 15.10.2023) (in Russian).

17. The strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions

until 2050 was approved by Order of the Government of the Russian Federation of October 29, 2021 No. 3052-r [Internet resource] <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (Accessed: 18.10.2023) (in Russian).

18. Klementovich Ya.Ya., Sarakhanova N.S. Corporate strategies for adapting the largest energy companies to the low-carbon trend // *Gas industry*. 2022. No. 1 (827). P. 92–100 (in Russian).

19. The energy strategy of Russia until 2050 will be approved by September 15 // *Energy and industry of Russia, 2022* [Internet resource] <https://www.eprussia.ru/news/base/2022/958.htm?ysclid=leq26q6xbr269545997> (Accessed: 21.10.2023) (in Russian).

20. The concept of hydrogen energy development. Order of the Government of the Russian Federation of August 5, 2021 No. 2162-r [Internet resource] <http://government.ru/news/42971/> (Accessed: 20.10.2023) (in Russian).

21. Wind energy market. The RES CSA program is carried out in two stages: CSA 1.0 in the period from 2013 to 2024; DPM 2.0. in the period from 2025 to 2035 [Internet resource] <https://www.eprussia.ru/upload/iblock/42a/c0imfdotv1rmhxr0hzpeqngztsollj92/%D0%A0%D0%90%D0%92%D0%98.pdf?ysclid=lobi09bwvk139426335> (Accessed: 25.10.2023) (in Russian).

22. Where the wind blows: problems and prospects of “green” energy // *Unipro megawatt, 2021* [Internet resource] <https://mw.unipro.energy/rubric/proizvodstvo/otkudaveter-duet-problemy-i-perspektivy-zelenoy-energetiki/?ysclid=leyh86o02154021018> (Accessed: 16.10.2023) (in Russian).

23. Maksimov A. RES 2.0: New program for the development of “green” energy in Russia // *Energeticheskaya politika*. 2020. No. 11 (153). P. 22–27 (in Russian). doi: 10.46920/2409-5516\_2020\_11153\_22

24. Russian potential of solar energy [Internet resource] [https://www.cdu.ru/tek\\_russia/articles/8/1050](https://www.cdu.ru/tek_russia/articles/8/1050) (Accessed: 15.10.2023) (in Russian).

25. In Russia, the construction of all solar power plants under CSA RES 1.0 has been completed // *Peretok.Ru Energy in Russia and the world* [Internet resource] <https://peretok.ru/news/generation/25138/?ysclid=leq4q9d54c947283361> (Accessed: 10.10.2023) (in Russian).

26. Quarterly information review of the renewable energy market in Russia. IV quarter 2022 [Internet resource] [https://www.bigpowernews.ru/photos/0/0\\_QQauIvL5PeWofPSGasFNMMgPXubot57k.pdf](https://www.bigpowernews.ru/photos/0/0_QQauIvL5PeWofPSGasFNMMgPXubot57k.pdf) (Accessed: 10.10.2023) (in Russian).

27. Recommendations of the round table of the State Duma Committee on Energy on the topic “On legislative support for the development of distributed generation for remote and hard-to-reach territories of the Far North and Far East” dated May 20, 2021, approved. By decision of the State Duma Committee on Energy No. 3.25-5/182 of June 15, 2021 [Internet resource] <http://komitet2-13.km.duma.gov.ru/Rabota/Rekomendacii-po-itogam-meropriyatij/item/26802626/> (Accessed: 10.10.2023) (in Russian).

28. Generation facilities in isolated and hard-to-reach areas. Analytical report. March 2020 [Internet resource] [https://www.bigpowernews.ru/photos/0/0\\_mJk1g3J6K7uvY13o-aJ21tkgVR02S2xAG.pdf](https://www.bigpowernews.ru/photos/0/0_mJk1g3J6K7uvY13o-aJ21tkgVR02S2xAG.pdf) (Accessed: 10.10.2023) (in Russian).

29. Microgeneration based on renewable energy sources. June 2017 [Internet resource] <https://ac.gov.ru/files/publication/a/13570.pdf> (Accessed: 10.10.2023) (in Russian).

30. Salygin V.I., Deniz D.S. Retrospective of the formation of concepts in the field of energy security and synthesis of modern approaches: BRICS countries // Economic relations. 2021. V. 11. No. 4. P. 759–774 (in Russian).

31. Buchnev A.O. State management of the development of renewable and non-renewable energy // International scientific journal. 2022. No. 2 (83). P. 58–70 [Internet resource] <https://www.ranepa.ru/upload/iblock/d89/buchnev-a-o-dissertation.pdf?ysclid=lfp3j3k6io128421095> (Accessed: 11.10.2023) (in Russian).

32. Salygin V.I., Deniz D.S. The potential of renewable energy and the transformation of the global fuel and energy balance: theoretical aspects // Issues of innovative economics. 2021. V. 11. No. 4. P. 1893–1904 (in Russian).

## Обеспечение энергетической безопасности России в условиях перехода к зелёному курсу экономики

© 2023. Н. Г. Гаджиев<sup>1</sup>, д. э. н., проректор по экономике и финансам,  
С. А. Коноваленко<sup>2</sup>, к. э. н., профессор,  
М. Н. Трофимов<sup>2</sup>, к. э. н., доцент,

<sup>1</sup>Дагестанский государственный университет,  
367001, Россия, г. Махачкала, ул. М. Гаджиева, д. 43-а,  
<sup>2</sup>Рязанский филиал Московского университета МВД России  
имени В. Я. Кикотя,  
390046, Россия, г. Рязань, ул. 1-я Красная, д. 18А,  
e-mail: fanat1k.fanat1k.fanat1k@yandex.ru

В последние годы всё большую значимость приобретает энергетическая безопасность страны. Актуальность исследования заключается в том, что необходимо развивать энергетику, своевременно выявлять и нейтрализовать существующие и возникающие угрозы энергетической безопасности России, что способствует постепенному переходу к зелёному курсу экономики и устойчивому социально-экономическому развитию. Цель работы заключается в исследовании теоретических аспектов энергетической безопасности, изучении её текущего и прогнозного состояния в Российской Федерации как локомотива зелёной экономики страны. При проведении исследования были применены такие методы, как диалектический метод познания, монографическое исследование, горизонтальный и вертикальный анализ, статистические методы, метод сравнения и обобщения информации, а также метод табличного представления информации. Переориентация энергетики на использование возобновляемых источников энергии является важной стратегической задачей России. Увеличение мощности генерирующих объектов, которые функционируют на основе возобновляемых источников энергии, способствует повышению качества энергоснабжения населения, снижению загрязнения окружающей среды и повышению уровня энергетической безопасности. Авторами проведена оценка текущего и перспективного состояния энергетической безопасности в стране. Сделан вывод о необходимости структурных изменений в энергетике с целью достижения плановых показателей энергетической безопасности и зелёной экономики.

**Ключевые слова:** энергетическая безопасность, индикаторы и показатели, прогноз, зелёный курс, экологическая устойчивость.

## Ensuring Russia's energy security in the context of the transition to a green economy

© 2023. N. G. Gadzhiev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-6321-3543<sup>\*</sup>

S. A. Konovalenko<sup>2</sup> ORCID: 0000-0001-9696-942X<sup>\*</sup>

M. N. Trofimov<sup>2</sup> ORCID: 0000-0002-7194-0468<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Dagestan State University,  
43-a, M. Gadzhieva St., Makhachkala, Russia, 367001,

<sup>2</sup>Ryazan branch of Moscow University  
Ministry of Internal Affairs of Russia named after V. Ya. Kikot,  
18A, 1st Krasnaya St., Ryazan, Russia, 390046,  
e-mail: fanat1k.fanat1k.fanat1k@yandex.ru

In modern conditions, each state strives to ensure its economic security, thereby trying to create the necessary conditions for stability and sustainable development. In recent years, the country's energy security, which is a key component of economic security, has become increasingly important. The relevance of the study lies in the fact that in modern socio-economic conditions of the country's development it is necessary to develop the energy sector, promptly identify and neutralize existing and emerging threats to Russia's energy security, which contributes to a gradual transition to a green economic course. The purpose of the work is to study the theoretical aspects of energy security, study its current state in the Russian Federation, as well as develop measures to facilitate the transition to a green economic course.

When conducting the research, methods such as the dialectical method of cognition, monographic research, horizontal and vertical analysis, statistical methods, the method of comparing and summarizing information, as well as the method of tabular presentation of information were used. Russia's energy security is gradually developing, as evidenced by the increase in some indicators and the decrease in others, while there is a need for further development and additional government regulation in order to achieve a higher level of energy security. Reorientation of the energy sector to the use of renewable energy sources is an important strategic task for Russia. Increasing the capacity of generating facilities that operate on the basis of renewable energy sources helps improve the quality of energy supply to the population, reduce environmental pollution and increase the level of energy security. The authors studied the theoretical aspects of energy security. An assessment of the current and future state of energy security in the country was carried out. A conclusion is made about the need for structural changes in the energy sector in order to achieve planned energy security indicators.

**Keywords:** energy security, indicators and indicators, forecast, green economy course, events.

В последние годы одной из важнейших составляющих экономической безопасности Российской Федерации (РФ) стала энергетическая безопасность.

Энергетическая безопасность – это состояние защищённости экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечиваются потребности в энергии экономически доступными топливно-энергетическими ресурсами.

Энергетическая безопасность характеризуется тремя главными факторами:

- способностью топливно-энергетического комплекса обеспечивать экономику качественными, дешёвыми и экологически чистыми ресурсами;

- способностью экономики рационально расходовать энергоресурсы;

- высоким уровнем устойчивости систем энергетики.

Реализация данных факторов возможна при обеспечении благоприятных экономических, институциональных, политических и других условий [1].

Сегодня связь между энергетической безопасностью и зелёным курсом экономики неоспорима. Зелёный курс экономики направлен на переход к более устойчивой и экологически безопасной экономике, а это невозможно без обеспечения энергетической безопасности [2].

Система энергетического законодательства РФ включает в себя законы, постановления, нормативные акты и иные правовые документы, которые регулируют отношения в области производства, передачи, распределения, хранения, эксплуатации, потребления и экономии энергии, а также обеспечения энергетической безопасности. Такая система законодательства устанавливает правила для деятельности компаний, занимающихся производством, транспортировкой и сбытом энергоресурсов, а также для потребителей

энергии, определяя их права и обязанности в этой области. Она также может содержать меры по стимулированию использования возобновляемых источников энергии, регулированию цен на энергоресурсы и другие меры, направленные на поддержку энергетической эффективности и устойчивого развития [3].

Важнейшими нормативными документами в области энергетической безопасности являются:

1. «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», утверждена распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р, в которой определены цели и приоритеты развития энергетики в РФ, основные направления деятельности, проведена оценка состояния и тенденций развития энергетики России [4].

2. «Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации», утверждена Указом Президента РФ от 13.05.2019 № 216, является основополагающим документом стратегического планирования и содержит актуальные вызовы, угрозы и риски энергетической безопасности [5].

К ключевым документам также относятся:

- Федеральный закон от 21.07.2011 № 256-ФЗ «О безопасности объектов топливно-энергетического комплекса», устанавливающий организационные и правовые основы в сфере обеспечения безопасности объектов топливно-энергетического комплекса страны;

- Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», регламентирующий правовые, управленческие, организационные и хозяйственные основы отношений в сфере газоснабжения в государстве.

Огромное значение в системе энергетического законодательства РФ принадлежит Правовым актам Правительства РФ. Согласно Постановлению Правительства РФ от 29.12.2011 № 1178 «О ценообразовании в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике» в нашей стране устанавли-

ливаются базовые аспекты ценообразования и правила государственного регулирования тарифов в электроэнергетике [6]. Примером ведомственных актов может служить Приказ ФСТ России от 06.08.2004 № 20-э/2 (ред. от 15.02.2022) «Об утверждении Методических указаний по расчёту регулируемых тарифов и цен на электрическую (тепловую) энергию на розничном (потребительском) рынке», который устанавливает методические основы расчёта регулируемых тарифов и цен на электрическую и тепловую энергию на розничном рынке [7].

Цель работы заключается в исследовании теоретических аспектов энергетической безопасности, изучении её текущего и прогнозного состояния в Российской Федерации как локомотива зелёной экономики страны.

### Объекты и методы исследования

При проведении исследования были применены такие методы, как монографическое исследование, горизонтальный и вертикальный анализ, статистические методы, метод сравнения и обобщения информации, а также метод табличного представления информации. При построении прогноза основных показателей отрасли на среднесрочную перспективу применялся метод экстраполяции данных.

**Индикаторы и показатели энергетической безопасности.** Оценить уровень энергетической безопасности страны представляется возможным с помощью индикаторов или показателей энергетической безопасности [8, 9].

Согласно методике [10] индикаторы энергетической безопасности могут быть классифицированы по следующим блокам (рис. 1).

Нормативные и прогнозные значения для данных показателей в настоящее время не определены, что является серьёзным недостатком в части обеспечения энергетической безопасности страны [11].

### Результаты и обсуждение

**Анализ показателей энергетической безопасности России.** Проведём анализ основных показателей энергетической безопасности и проследим динамику их изменения за период с 2019 по 2021 гг. (табл. 1).

Показатель энергоёмкости валового внутреннего продукта (ВВП) является одним из ключевых показателей для измерения энергетической эффективности экономики страны. Высокая энергоёмкость ВВП может указывать на неэффективное использование ресурсов и энергии. В то же время снижение энергоёмкости ВВП позволяет увеличить энергетическую эффективность экономики и сократить потребление энергии, что в свою очередь может способствовать более устойчивому и экологически безопасному развитию [12].

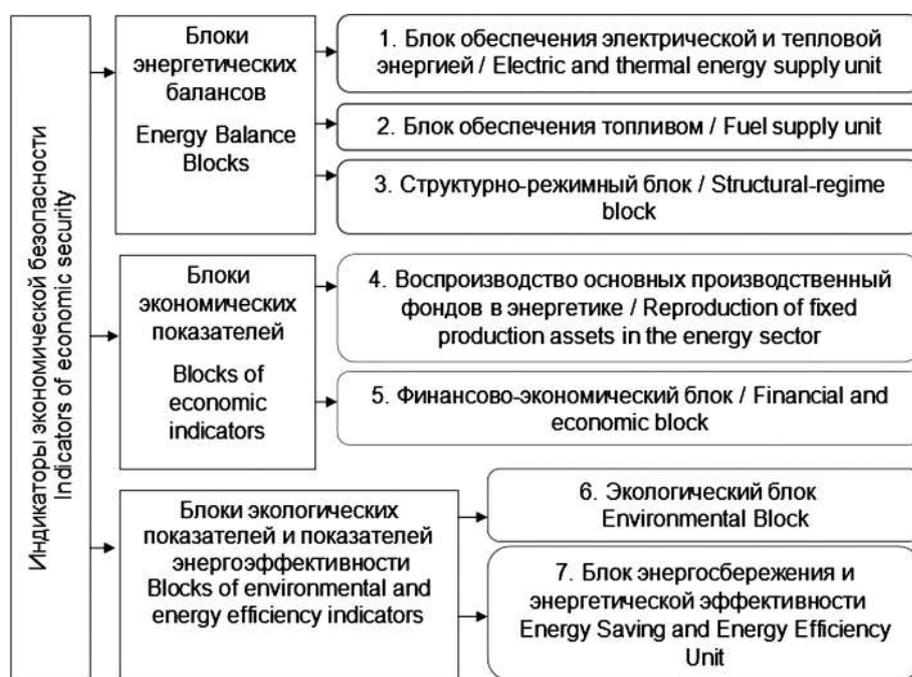


Рис. 1. Подразделение системы индикаторов энергетической безопасности по блокам  
Fig. 1. Subdivision of the system of energy security indicators by blocks

Таблица 1 / Table 1

Динамика индикаторов энергетической безопасности Российской Федерации в 2019–2021 гг.  
Dynamics of energy security indicators of the Russian Federation 2019–2020

Показатель / Indicator	Год / Year			Абсолютное отклонение Absolute deviation (+/-)	Отклонение 2021 г. в % к 2019 г. Deviation of 2021 in % to 2019
	2019	2020	2021		
Энергоёмкость ВВП, кг условного топлива на 10 тыс. рублей / Energy intensity of GDP, kg of conventional fuel/ per 10 thousand rubles	11,33	10,97	11,48	0,15	101,32
Потребление ТЭР на одного занятого в экономике страны, т усл. топлива Fuel and energy consumption per person employed in the country's economy, tons of conventional fuel	13,2	12,8	13,1	-0,1	99,2
Электровооружённость труда работников промышленных организаций, кВт·ч Electrical equipment of workers of industrial organizations, kW·h	74862,1	72988	75829	966,9	101,29
Доля электрической энергии, производимой с использованием ВИЭ, % The share of electric energy produced using renewable energy sources, %	17,5	19,8	19,0	1,5	108,57
Доля производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования ВИЭ, % The share of electric energy production by generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy sources, %	0,28	0,46	0,61	0,33	217,86
Потребление электроэнергии в расчёте на 1 человека, кВт·ч/чел. Electricity consumption per 1 person, kW·hour /person	1095,89	1114,0	1202,25	106,36	109,71
Мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, МВт / The capacity of generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy, MW	2010,9	3239,7	3876,6	1865,7	192,78

Потребление топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на одного занятого в экономике страны к 2020 г. снизилось на 0,4 т условного топлива или примерно на 3% по сравнению с 2019 г., а в 2022 г. – на 0,1 т у. т. или на 1%. Подобные изменения связаны с колебанием численности занятых в экономике страны.

Изменение электровооружённости труда работников промышленных организаций имеет неоднозначную тенденцию за исследуемый период. В 2020 г. произошло снижение показателя на 1874,1 кВт·ч или на 2,5% по сравнению с 2019 г., а в 2021 г. наблюдается увеличение показателя на 966,9 кВт·ч или на 1,3%. Значение показателя электрово-

оружённости труда имеет непосредственное отношение к экологии, так как оно отражает эффективность использования энергетических ресурсов в производстве.

Рисунок 2 описывает изменение доли производства электроэнергии, генерируемой объектами, работающими на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). На рисунке 3 отражено изменение доли электрической энергии, производимой с использованием ВИЭ.

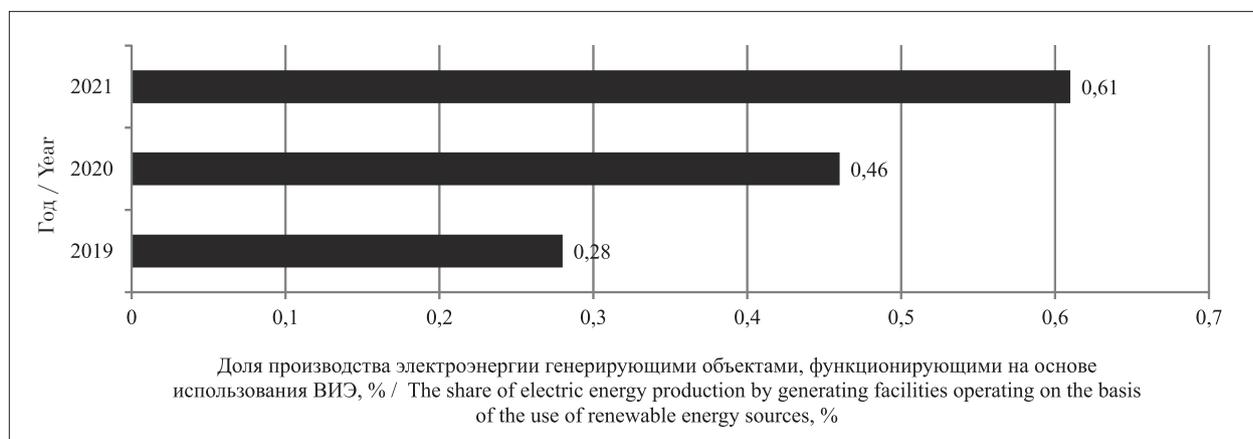
По результатам проведённого исследования показателей энергетической безопасности за период с 2019 по 2021 гг. можно сделать следующие выводы:

– около 33% рассмотренных показателей, таких как энергоёмкость ВВП, потребление ТЭР на одного занятого в экономике, электровооружённость труда работников промышленных организаций, имели тенденцию к снижению в 2020 г., при этом увеличивались к 2021 г. [13];

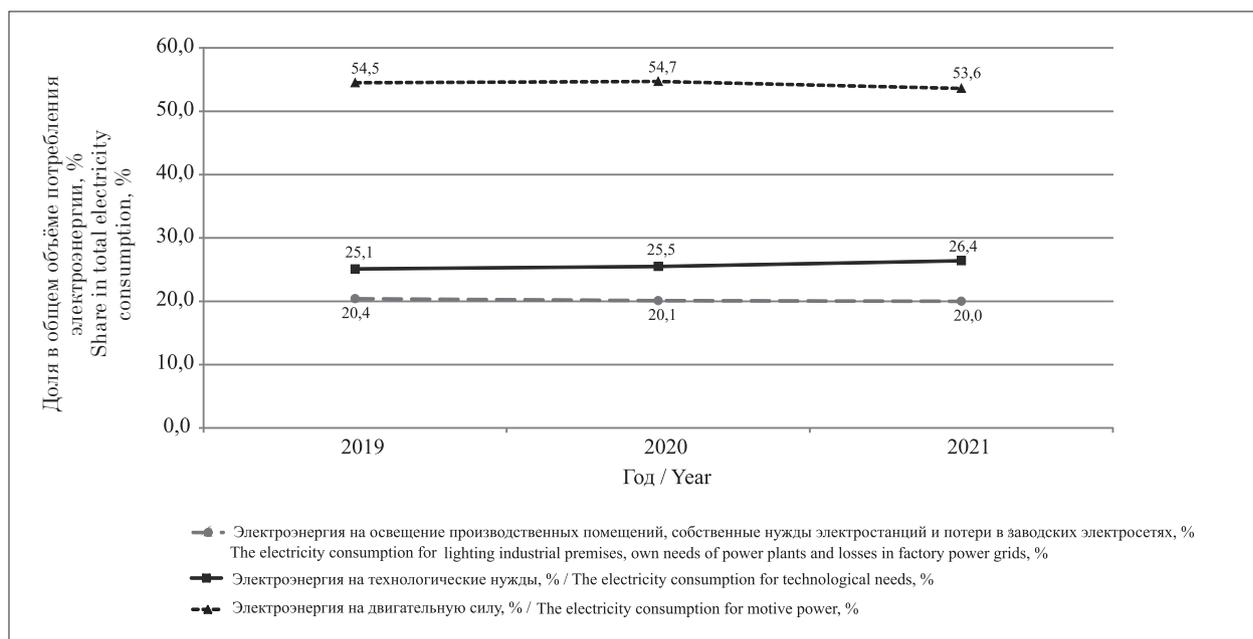
– можно выделить группу показателей, которые имели пик значения в 2020 г. и снижались в 2021 г. К ним относятся: доля электрической энергии, производимой с использованием ВИЭ, потребление электроэнергии в расчёте на 1 человека.

**Прогноз значений состояния систем энергетической безопасности России.** В современных условиях энергия играет ключевую роль, поэтому в качестве критериев оценки уровня развития любой страны выделяют обеспеченность её энергией [14].

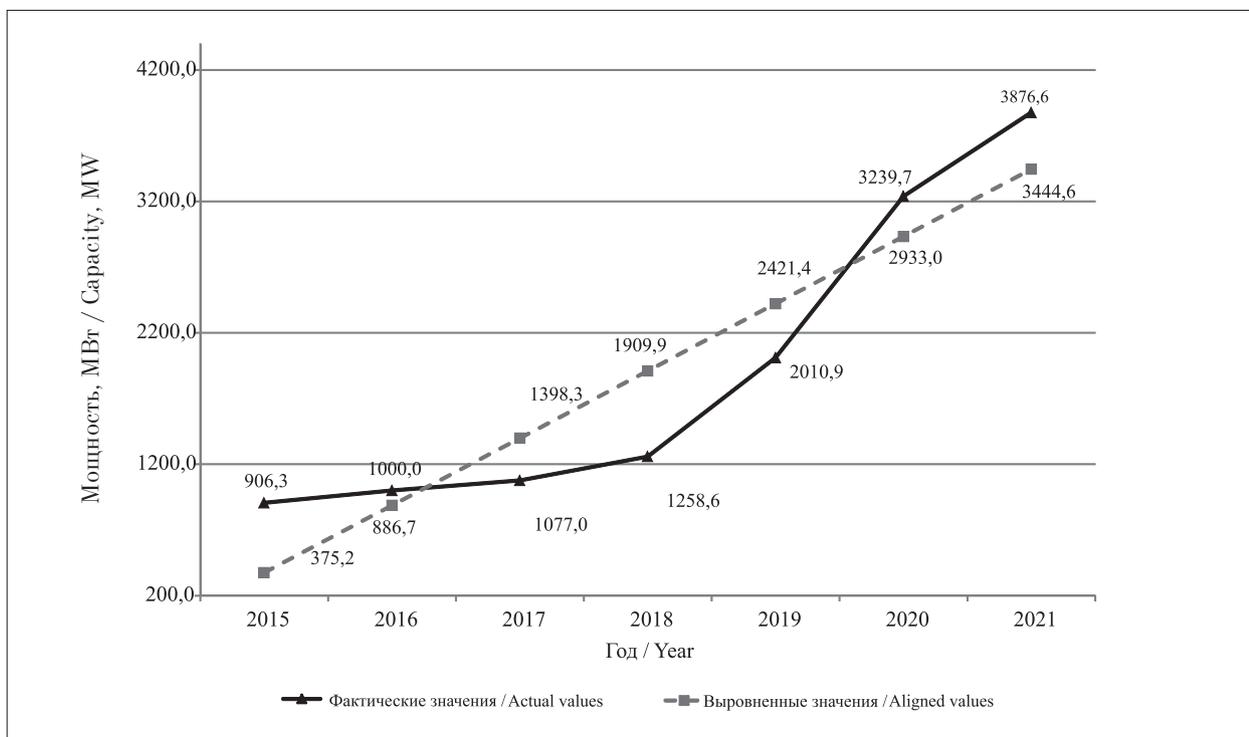
График, отражающий динамику фактических и выровненных значений мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, по результатам проведённого исследования представлен на рисунке 4. На рисунке просматривается тенденция к увеличению



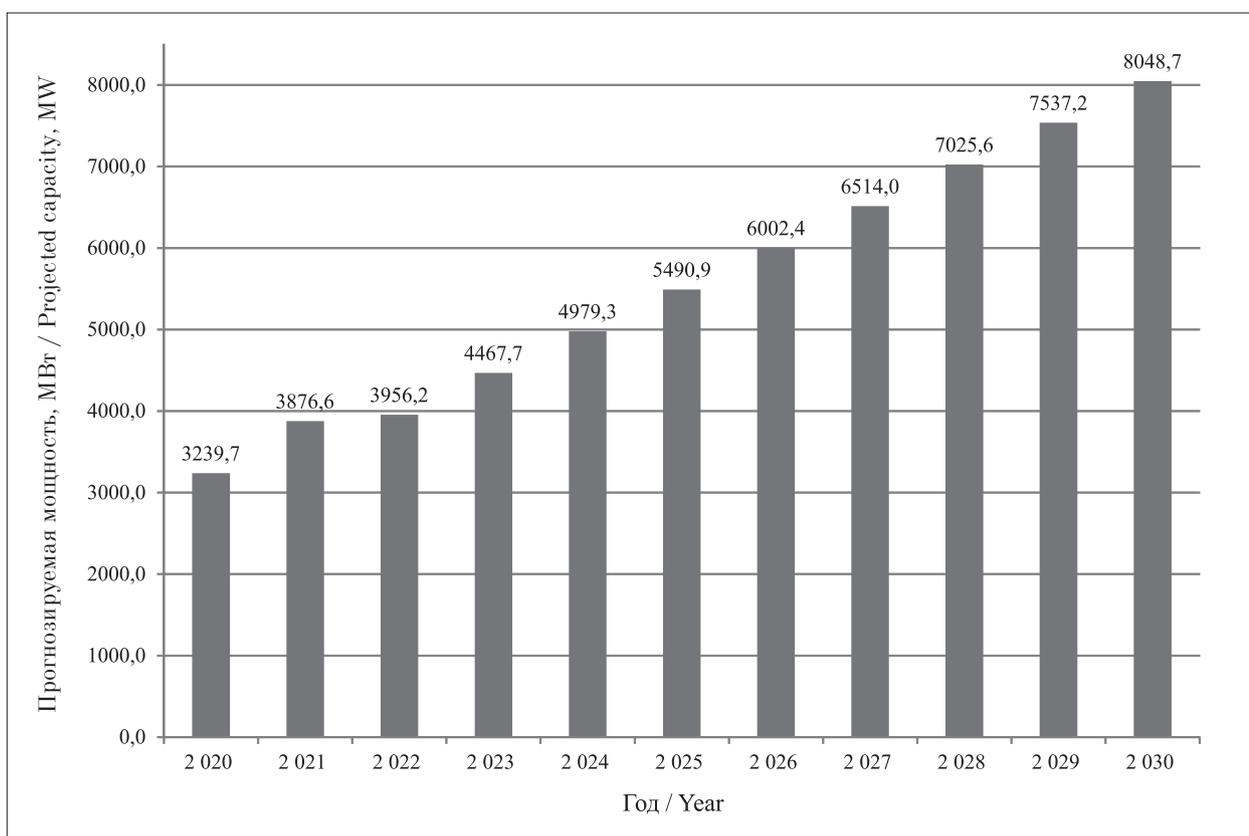
**Рис. 2.** Динамика доли производства электрической энергии генерирующими объектами, функционирующими на основе использования возобновляемых источников энергии, в России за 2019–2021 гг. / **Fig. 2.** Dynamics of the share of electric energy production by generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy in Russia for 2019–2021



**Рис. 3.** Динамика доли потребления электроэнергии на технологические нужды, на двигательную силу и на освещение производственных помещений в общем объёме потребления электроэнергии промышленных организаций в России за 2019–2021 гг. / **Fig. 3.** Dynamics of the share of electricity consumption for technological needs, for motive power and for lighting of industrial premises in the total electricity consumption of industrial organizations in Russia for 2019–2021



**Рис. 4.** Динамика фактических и выровненных значений мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ  
**Fig. 4.** Dynamics of actual and aligned power values of generating facilities operating on the basis of renewable energy use



**Рис. 5.** Прогноз значений мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, в Российской Федерации на период до 2030 г.  
**Fig. 5.** Forecast of the power values of generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy in the Russian Federation for the period up to 2030

Таблица 2 / Table 2

Прогноз мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, в РФ на период до 2030 г. с учётом предложений / Forecast of the capacity of generating facilities operating on the basis of the use of renewable energy in the Russian Federation for the period up to 2030, taking into account the proposals

Показатели / Indicators	Период исследования / Study period							
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Инвестиции государства, млн руб. State investments, million rubles	2989	3198	3422	3662	3918	4192	4360	4534
Прогнозируемая мощность, МВт Projected capacity, MW	4467	4979	5490	6002	6514	7025	7537	8048
Прогнозируемая мощность с учётом инвестиций, МВт / Projected capacity including investments, MW	4467	5003	5603	6275	7029	7872	8817	9875

мощности генерирующих объектов за счёт ВИЭ.

Прогнозные значения мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ, представлены на рисунке 5.

На основе анализа международного опыта можно сделать вывод, что увеличение инвестиций в развитие применения ВИЭ на 6,77% приводит к увеличению мощности объектов на 9%. С учётом того, что на основе проведённой экстраполяции данных мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе ВИЭ, было выявлено, что мощность будет увеличиваться в среднем на 9%, имеется возможность предположить, что вложение государственных инвестиций в данную сферу приведёт к увеличению мощности в среднем на 12% [15].

Развитие объектов, генерирующих энергию на основе ВИЭ, в РФ стоит рассматривать как ключевой фактор модернизации экономики, связанный с развитием и применением инновационных технологий и производств, улучшением социальных условий и экологической обстановки в стране [16].

Рассчитаем экономический эффект и сравним с прогнозными значениями (табл. 2).

Стоит отметить, что прогноз проведён с учётом того, что в 2023 г. инвестиции составят 2989 млн. рублей, затем первые пять лет (2024–2028 гг.) ежегодно государство будет увеличивать их объём на 7%, а после – на 4%. Данные мероприятия позволят более быстрыми темпами наращивать мощность объектов, работающих на основе ВИЭ, поскольку к 2030 г. будет достигнуто значение в 9875 МВт, что на 1827 МВт больше, чем прогнозное значение, полученное путём экстраполяции.

Кроме того, Россия достигнет более высокого уровня энергетической безопасности и будет занимать лидирующие позиции в рейтинге стран мира по применению объектов с использованием ВИЭ [17].

По результатам анализа современного состояния энергетической безопасности страны можно сделать вывод о том, что переориентация энергетики на использование ВИЭ является важной стратегической задачей России. Увеличение мощности генерирующих объектов, которые функционируют на основе ВИЭ, способствует повышению качества энергоснабжения населения, снижению загрязнения окружающей среды и повышению уровня энергетической безопасности [18–20]. В РФ данный показатель имеет тенденцию к постоянному росту и будет её сохранять в среднесрочной перспективе до 2030 г.

## Заключение

Энергетическая безопасность является одним из важнейших факторов устойчивого социально-экономического развития страны.

Отсутствие или нестабильность поставок энергоресурсов может привести к серьёзным экономическим, социальным и политическим проблемам, например, к сокращению производства, увеличению цен на энергию, потере рабочих мест и т.д. Кроме того, решение задач, связанных с энергетической безопасностью, включая развитие возобновляемых источников энергии, повышение энергоэффективности и снижение углеродного следа, способствует устойчивому развитию и сокращению воздействия на окружающую среду, повышению обеспечения благополучия населения в условиях перехода к зелёному курсу экономики страны.

## References

1. Karanina E.V., Karaulov V.M., Kartavykh K.E. Conceptual approach to diagnostics of environmental 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
2. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Rozhkova N.V., Saipullaev A.M. Modern green course of Russia: problems and prospects for implementation // *South of Russia: Ecology, Development*. 2022. V. 17. No. 3 (64). P. 197–207 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2022-3-197-207
3. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Akhmedova Kh.G., Gadzhidadaev M.Z., Gadzhieva U.A. Theoretical aspects of the effectiveness of assessing economic damage in the field of environmental audit: problems and solutions // *South of Russia: Ecology, Development*. 2020. V. 15. No. 4 (57). P. 137–144 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2020-4-137-144
4. Ivanova T.E., Gavrilova M.A., Skomoroshchenko K.V. Legal environment for ensuring energy security: experience of content analysis of Russia's energy strategy // *Ehkonomika, predprinimatel'stvo i pravo*. 2018. V. 8. No. 3. P. 153–162 (in Russian).
5. Kologermanskaya E.M. Legal analysis of corporate governance in companies of the electricity market provided by renewable sources // *Yuridicheskii mir*. 2020. No. 2. P. 53–56 (in Russian).
6. Gubaidullina I.N. Energy security as a component of the national security system of the modern state // *Gorizonty ehkonomiki*. 2018. No. 3 (43). P. 10–14 (in Russian).
7. Domrachev D.G., Kirillovykh A.A. On the issue of implementing environmental control and supervision in the Russian Federation: questions of theory and practice // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 3. P. 110–119 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-110-119
8. Tselin V.E., Agadzhanova M.A. Proposals for improving the process of monitoring the level of energy efficiency of sectors of the economy of the Russian Federation // *Problems of analysis and modeling of regional socio-economic processes: materialy dokladov VI mezhdunarodnoy zaochnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo universiteta, 2016. P. 10–13 (in Russian).
9. Alibaev T.L. Criteria and indicators of the level of energy security of the state // *Ehkonomika i biznes: teoriya i praktika*. 2019. No. 1. P. 21–23 (in Russian). doi: 10.24411/2411-0450-2018-10292
10. Kurbonov A.R., Khodzhaev D.Kh. Study of energy security indicators at the present stage // *Fundamental science and technology – promising developments: Materialy XX mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. North Charleston: LuluPress, Inc., 2019. P. 75–81 (in Russian).
11. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Gadzhiev A.N. The role and importance of environmental safety in the system of ensuring the economic security of the state // *South of Russia: Ecology, Development*. 2021. V. 16. No. 3 (60). P. 200–214 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2021-3-200-214
12. Molchan A.S., Anufrieva A.P., Telyatnik D.A., Zarovnaya L.S. Assessing the level of energy and raw material security of Russia // *Ehkonomika i predprinimatel'stvo*. 2022. No. 2 (139). P. 35–41 (in Russian). doi: 10.34925/EIP.2022.139.2.003
13. Askhabov Kh.R., Ehl'murzaev A.A., Taramov Yu.Kh. Prospects for the development of renewable energy sources in the regions of Russia // *Geoenergy – 2019: Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii / Ed. M.Sh. Mintshev. Grozny: NPP "Geosfera", 2019. P. 66–73 (in Russian).*
14. Korotkii R.P., Veselova N.M., Nemchenko A.V., Salienco V.V. Place and assessment of energy security in the system of economic and national security of modern Russia // *Vektor ehkonomiki*. 2019. No. 12 (42). P. 66 (in Russian).
15. Dobrinova T.V., Kovarda A.V. Analysis of the main threats and principles of ensuring energy security of Russia // *Alleya nauki*. 2018. V. 1. No. 6 (22). P. 165–170 (in Russian).
16. Gadzhiev N.G., Konovalenko S.A., Trofimov M.N., Kornilovich R.A., Akhmedova H.G. "Ecological economics" is the most important part of the Global Commons ideology in ensuring sustainable socio-economic development of society // *South of Russia: Ecology, Development*. 2019. V. 14. No. 4. P. 17–24 (in Russian). doi: 10.18470/1992-1098-2019-4-17-24
17. Alibaev T.L. Development of an energy saving management system taking into account energy security indicators // *Gorizonty ehkonomiki*. 2018. No. 6 (46). P. 64–67 (in Russian).
18. Obaidi A.I. The role of renewable energy sources in achieving sustainable development (model for the Republic of Iraq) // *Management in Economic and Social Systems*. 2020. No. 4 (6). P. 59–63.
19. Sheina S.G., Grachev K.S. Best European practices for the introduction of renewable energy sources in the Russian Federation // *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2019. No. 5 (56). P. 2 (in Russian).
20. Sinyak Yu.V., Nekrasov A.S., Voronina S.A., Semikashev V.V., Kolpakov A.Yu. Fuel and energy complex of Russia: opportunities and prospects // *Problems of forecasting*. 2013. No. 1 (136). P. 4–21 (in Russian).

**О методических подходах к определению углеродного следа**

© 2022. **Б. И. Кочуров<sup>1</sup>**, д. г. н., профессор,  
**М. Ю. Глуховская<sup>2</sup>**, к. т. н., доцент,  
**М. Ю. Гарицкая<sup>2</sup>**, к. б. н., доцент,  
**Т. А. Евстифеева<sup>2</sup>**, к. с-х. н., доцент,

<sup>1</sup>Институт географии Российской академии наук,  
 119017, Россия, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29,  
<sup>2</sup>Оренбургский государственный университет,  
 460015, Россия, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13,  
 e-mail: info@ecoregion.ru, commarina97@mail.ru

В настоящий момент проблема изменения климата, связанная с выбросами в атмосферу парниковых газов (ПГ), является одной из актуальных в обществе. В статье отмечено, что на протяжении последних десятилетий для решения вопросов, связанных с глобальной климатической повесткой, разрабатываются и совершенствуются экономические механизмы ответственности для эмитентов парниковых газов. Одним из новшеств является принятие Европарламентом в 2021 году механизма трансграничного регулирования посредством внедрения дополнительного сбора с товаров, в процессе производства которых выделяется большое количество ПГ. На международном и национальном уровнях принят ряд договоренностей и законодательных актов, направленных на снижение выбросов климатически активных газов и создан ряд организаций, занимающихся вопросами в сфере углеродного регулирования. В работе представлена ретроспектива основных документов, направленных на регулирование выбросов ПГ, принятых в Российской Федерации.

Авторами рассмотрены основы методического обеспечения углеродного регулирования. Показано, что для определения величины полного углеродного следа хозяйственной и иной деятельности, необходим учёт выделения парниковых газов на всех этапах жизненного цикла продукции и услуг. В статье говорится о существовании методик или программных продуктов, помимо официальных, позволяющих рассчитать углеродный след каждого человека.

Отмечено, что на национальном уровне в сферу обязательного учёта не включены выбросы ПГ, связанные с деятельностью компании, но образующиеся за пределами территории отчитывающейся организации, что не позволяет оценить фактическую величину углеродной нагрузки.

**Ключевые слова:** углеродный след, углеродное регулирование, экологическое законодательство, парниковый эффект, парниковые газы.

**On methodological approaches to determining the carbon footprint**

© 2022. **B. I. Kochurov<sup>1</sup>** ORCID: 0000-0002-8351-3658\* **M. Yu. Glukhovskaya<sup>2</sup>** ORCID: 0000-0001-8576-1447\*  
**M. Yu. Garitskaya<sup>2</sup>** ORCID: 0000-0003-2292-5859\* **T. A. Evstifeeva<sup>2</sup>** ORCID: 0000-0002-0021-8718\*

<sup>1</sup>Institute Geography of Russian Academy of Sciences,  
 29, Staromonetnyy Pereulok, Moscow, Russia, 119017,  
<sup>2</sup>Orenburg State University,  
 13, Pobedy Ave., Orenburg, Russia, 460015,  
 e-mail: info@ecoregion.ru, commarina97@mail.ru

At the moment, the problem of climate change associated with greenhouse gases (GHG) emissions into the atmosphere is one of the most urgent in society. The article notes that over the past decades, in order to address issues related to the global climate agenda, economic liability mechanisms for emitters of greenhouse gases have been developed and improved. One of the innovations is the adoption by the European Parliament in 2021 of a mechanism for cross-border regulation through the introduction of an additional fee on goods that emit a large amount of GHG during the production process. At the international and national levels, a number of agreements and legislative acts have been adopted aimed at reducing emissions of climate-active gases and a number of organizations have been created dealing with issues in the field of carbon regulation. The paper presents a retrospective of the main documents aimed at regulating GHG emissions adopted in the Russian Federation.

The authors have considered the fundamentals of methodological support of carbon regulation. It is shown that in order to determine the value of the full carbon footprint of economic and other activities, it is necessary to take into account the emission of greenhouse gases at all stages of the life cycle of products and services. The article talks about the existence of methods or software products, in addition to official ones, that allow calculating the carbon footprint of each person.

It is noted that at the national level, the scope of mandatory accounting does not include GHG emissions associated with the company's activities, but generated outside the territory of the reporting organization, which does not allow to estimate the actual value of the carbon load.

**Keywords:** carbon footprint, carbon regulation, environmental legislation, the greenhouse effect, greenhouse gases.

Одной из наиболее актуальных задач, объединяющих в настоящее время бизнес, промышленность и научное сообщество в целях сохранения климатической стабильности, является разработка глобальной системы экономических, технологических и организационных мер, позволяющих значительно снизить выброс парниковых газов (ПГ) в атмосферу Земли [1].

Мировое сообщество в целом, отдельные государства, крупные промышленные компании находятся в поиске новых подходов, направленных одновременно на решение глобально значимой климатической проблемы и сохранение экономической конкурентоспособности.

Цель работы – провести анализ полноты и качества методического обеспечения процесса определения углеродного следа хозяйственной и иной деятельности.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования являются механизмы углеродного регулирования на международном и национальном уровне. Предметом исследования были определены «Методические указания и руководства по количественному определению объёма выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации» (утверждены Приказом Минприроды РФ от 30.06.2015 № 300), «Методические указания по количественному определению объёма косвенных энергетических выбросов парниковых газов» (Приказ Минприроды РФ от 29.06.2017 г. № 330), а также методические рекомендации по проведению добровольной инвентаризации объёма выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации (РФ) (Распоряжение Минприроды РФ от 16 апреля 2015 г. № 15-р).

В ходе исследования полноты и качества методического обеспечения в области углеродного регулирования применён комплексный подход, основанный на синтезе, дедукции, аналогии, измерении и применении элементов системного и ретроспективного анализа.

### Результаты и обсуждение

Впервые более чем 180 стран мира объединились с целью решения проблем изменения климата на «Саммите Земли» в Рио-де-Жанейро в 1992 г., где была принята Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК ООН), вступившая в силу 21 марта 1994 г. Её положения были конкретизированы в Киотском протоколе [2].

В 2015 г. в рамках Парижского соглашения были актуализированы поставленные ранее Киотским протоколом задачи по снижению выбросов ПГ в атмосферный воздух. С момента заключения Парижского соглашения начался процесс создания международных и страновых императивов, позволяющих приступить к реализации экономических механизмов.

Переход мирового сообщества на путь реализации мер по повсеместному сокращению выбросов ПГ запустил процесс создания ряда международных структур, деятельность которых распространяется на круг вопросов в сфере климатических изменений. Результаты анализа систематизированных авторами данных представлены в таблице 1.

В рамках реализации инициатив, направленных на сокращение выбросов ПГ минимум на 55% к 2030 г. по сравнению с 1990 г. и достижение их нулевого уровня к 2050 г., 14 июля 2021 г. Еврокомиссия представила проект пакета климатического законодательства, включающий как новые предложения, так и поправки в существующие законы. Одной из новых и ключевых инициатив является внедрение механизма трансграничного углеродного регулирования (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM), который предусматривает дополнительный сбор за импортируемые в ЕС товары, при производстве которых формируется значительный углеродный след.

Механизм пограничной углеродной корректировки (Carbon Border Adjustment Mechanism) будет вводиться постепенно. Так, с 2023 г. (упрощённая адаптивная схема) производителей обяжут отчитываться о размере углеродного следа своей продукции, а с 2026 –

Таблица 1 / Table 1

Международные организации в области углеродного регулирования  
International organizations in the field of carbon regulation

Наименование структуры Structure name	Год создания Year of creation	Функции / Function
Международная база данных CDP (Carbon Disclosure Project)	Создана в 2002 г. CDP опирается на концепцию GRI по раскрытию информации об окружающей среде (ОС) Проект CDP официально запущен в России в 2009 г.	Способствует компаниям и городам раскрывать своё воздействие на ОС. Деятельность направлена на то, чтобы сделать экологическую отчётность и управление рисками бизнес-нормой, стимулируя раскрытие информации, понимание и действия в направлении устойчивой экономики
Фонд МСФО (IASB Foundation)	Образован в 2001 г. в ходе реорганизации системы МСФО, с января 2010 г. – Фонд МСФО	Создание единых стандартов, связанных с устойчивым развитием в условиях изменения климата. Направления деятельности актуализированы в 2021 г. на Конференции ООН по изменению климата (COP26) в Глазго
Совет по стандартам раскрытия информации о климате (CDSB – Climate Disclosure Standards Board, 31.01.2022 г. объединён в Фонд МСФО)	CDSB создан в 2007 г. Консолидация от 31.01.2022 г. подтверждает закрытие CDSB. Июнь 2022 г. – формирование Международного совета по стандартам устойчивого развития (ISSB)	Создание основы для отчётности об ОС и социальной информации, раскрытии финансовой информации, связанной с климатом (TCFD). Структура CDSB создана для представления экологической и социальной информации, технического руководства по климату, воде и в целях раскрытия информации о биоразнообразии
Международный совет по стандартам устойчивого развития International Sustainability Standards Board (ISSB)	Сформирован в 2021 г. Осуществляет свою деятельность под надзором Фонда МСФО	Создание базовых стандартов раскрытия информации в области устойчивого развития с целью обеспечения сопоставимости раскрываемой информации на финансовых рынках и в различных отраслях
Целевая группа по раскрытию финансовой информации, связанной с климатом Task Force on Climate Related Financial Disclosures (TCFD)	Учреждена в декабре 2015 г.	Оценка рисков, связанных с климатом в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективе. Проводится опрос компаний об их отчётности, связанной с климатом и публикуются агрегированные результаты
Международная независимая организация по стандартизации Global Reporting Initiative (GRI)	Впервые созданная в 2000 г. система отчётности GRI	Составная часть деятельности – климатическая повестка. Свыше 10 тыс. организаций в 100 странах мира раскрывают данные по стандартам GRI – универсальные стандарты для отчётности в области устойчивого развития, а также отраслевые стандарты
Совет по стандартам учёта в области устойчивого развития Sustainability Accounting Standards Board (SASB)	Организация, основанная в 2011 г. для разработки стандартов. Стандарты запущены в ноябре 2018 г.	Созданы кодифицированные стандарты для 77 отраслей 11 секторов экономики. Ориентируются на влияние экологических, социальных и управленческих факторов (ESG) на финансовые показатели компаний, что приводит к необходимости стандартизированной отчётности данных ESG

платить особый сбор (полная реализация действия механизма).

В соответствии с действующей версией законодательства по климату, трансграничный

углеродный налог будет взиматься за экспорт товаров из следующих групп: цемент, чёрные металлы и сталь (в том числе трубы и рельсы), алюминий, нефть, газ и удобрения. Произ-

водство перечисленных наименований товаров сопровождается выбросом наибольших объёмов ПГ, в первую очередь, углекислого газа (carbon leakage) [3, 4].

Углеродный налог является для перечисленных производств рыночным инструментом, создающим фактическую цену на углерод. Он позволяет монетизировать ущерб окружающей среде с помощью количественной оценки издержек, которые придётся понести экономике и обществу в целом для преодоления негативных последствий выбросов ПГ. На практике реализация механизма углеродного регулирования осуществляется путём включения дополнительного сбора в стоимость импортируемой в ЕС продукции. Достижению цели перехода к углеродной нейтральности служит и создаваемая система торговли квотами на выброс ПГ (emissions trading system, ETS).

По состоянию на 2021 г. Всемирный банк насчитал 64 действующих или имеющих дату начала действия инициативы по углеродному ценообразованию. Инициативы охватывают 46 национальных и 35 субнациональных юрисдикций и покрывают 22,3% глобальных выбросов ПГ (22 Гт CO<sub>2</sub>-экв) [5].

В РФ в настоящее время регулирование выбросов ПГ находится на начальном этапе развития.

В ходе исследований был проведён ретроспективный анализ процесса принятия основных документов, обеспечивающих углеродное

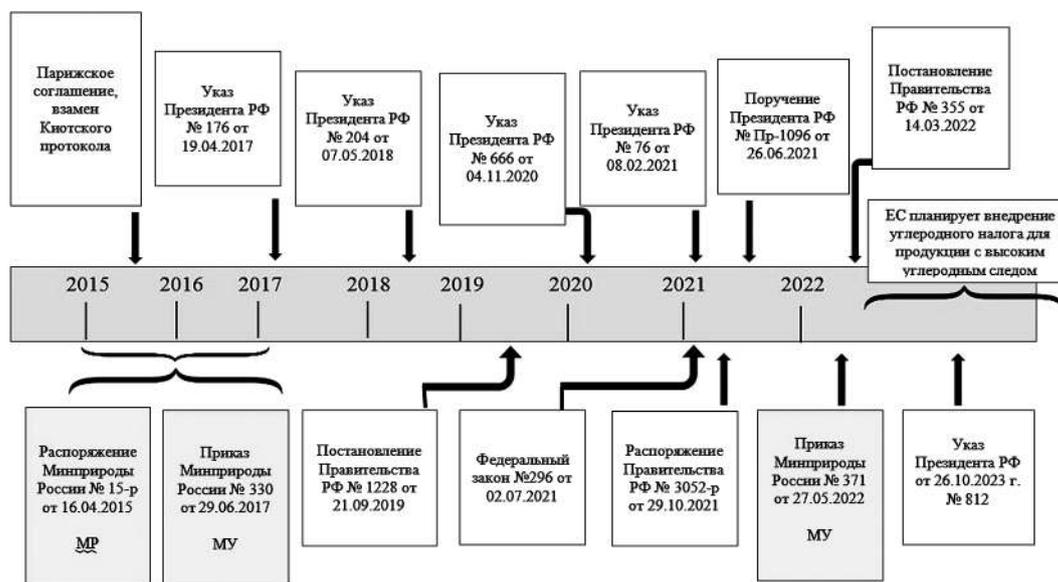
регулирование на национальном уровне, его результаты представлены на рисунке.

Существующее в РФ законодательное обеспечение направлено на уменьшение выбросов и, как следствие, уменьшение углеродного следа, который образуется в результате как промышленной, так и сельскохозяйственной деятельности. Юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие свою деятельность в заявленных сферах, являются носителями обязанностей в области ограничения выбросов ПГ [6–13].

В соответствии со статьёй 7 Федерального закона от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», к регулируемым с 1 января 2023 г. относятся организации, масса выбросов ПГ которых более 150 тыс. т углекислого газа в год, с 1 января 2024 г. – более 50 тыс. т [7].

Субъекты хозяйственной деятельности, попавшие под регуляторный механизм, должны ежегодно, до 1 июля следующего за отчётным года, представлять в уполномоченный федеральный орган исполнительной власти отчёты о выбросах ПГ, а также исходные сведения, на основании которых определена масса этих выбросов. Законодательством предусмотрена ответственность за несвоевременное представление такого отчёта, а также за представление в указанном отчёте недостоверной информации.

По этой причине многие предприятия заинтересованы в наличии чёткого и понятного



МУ – методические указания, МР – методические рекомендации

Рис. Основные документы по углеродному регулированию на национальном уровне  
Fig. Documents on carbon regulation at the national level

механизма определения массы выбросов ПГ – углеродного следа своей производственной деятельности. В 2021 г. был принят ГОСТ 14067-2021, в тексте которого определены принципы, требования и рекомендации, предложенные действующими международными стандартами по оценке жизненного цикла продукции с установлением специальных требований к количественной оценке её углеродного следа.

Величина углеродного следа зависит от объёма прямых и косвенных выбросов, классифицируемых по 3-м категориям: Score 1, 2 и 3 [14].

Прямые – это эмиссия в результате функционирования источников выбросов ПГ, работающих на предприятии и находящихся в собственности, распоряжении или пользовании данной компании.

Косвенные выбросы связаны с деятельностью отчитывающейся организации, но источники эмиссии принадлежат другим компаниям.

Score 1 – это прямые выбросы ПГ из источников, принадлежащих компании, или же тех, на которые распространяется её контроль. К числу таких выбросов можно отнести, например, эмиссию ПГ от собственных котельных, генерирующих тепло и электроэнергию, технологических операций и процессов, деятельности, сопровождающей обращение с отходами производства и потребления. Фугитивные выбросы (организованные постоянные или залповые выбросы в результате удаления технологических газов, например, оксиды азота при осуществлении кальцинирующего обжига в цветной металлургии, углекислого газа при производстве окатышей в чёрной металлургии или выделение метана в процессе продувки скважин и проч.), также относятся к категории прямых выбросов, подлежащих определению и учёту.

К этой же категории относится выделение ПГ, связанное с физической или химической обработкой сырья и материалов, транспортировкой материалов, продуктов, отходов, а также персонала. Выделение ПГ в результате негерметичности оборудования, его поломок и обрывов также категоризируются как Score 1.

Score 2 («энергетические» выбросы) – это косвенная категория выбросов, поступающих в атмосферу при производстве энергии сторонними компаниями. Score 2 учитывает закупаемую, а не производимую на собственных мощностях энергию в виде, в том числе, пара, тепла, энергии для охлаждения чего-либо. Большое число компаний в качестве углеродного следа своей деятель-

ности будут оценивать преимущественно ПГ, выброшенные сторонними организациями в процессе генерирования тепла и энергии, которые затем продаются отчитывающемуся субъекту хозяйственной и иной деятельности. К инструментам сокращения величины углеродного следа в этом случае можно отнести финансирование инвестиционных проектов в области энергоэффективных технологий и энергосбережения.

Score 3 – область охвата, которая определяет выбросы, не учтённые Score 1 и 2. Это косвенные выбросы, связанные с деятельностью компании, но производимые на источниках, ею не контролируемых, например, эмиссия ПГ в процессе добычи сырья, с последующим изготовлением материалов, которые закупает компания, выбросы транспортных средств, которые перевозят приобретаемое ей топливо, материалы и оборудование, поступление климатически активных газов, связанные с утилизацией продукции, произведённой компанией по окончании срока её службы и т. д. Расчёт величины Score 3 необязателен на настоящий момент, но, по причине того, что вклад выбросов этой категории в суммарный углеродный след наиболее велик, регулирование таких выбросов в максимальной степени определяет эффективность управления ПГ [15, 16].

В РФ расчёт прямых выбросов в составе углеродного следа производится согласно методическим указаниям и руководству по количественному определению объёма выбросов ПГ, утверждённых Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ 30.06.2015 № 300.

Для определённых категорий источников выбросов ПГ их количественное определение осуществляется с использованием следующих методов расчёта:

- с учётом данных о деятельности и коэффициентов выбросов;
- на основе данных материально-сырьевого баланса;
- на основе периодических измерений выбросов ПГ;
- на основе данных непрерывного мониторинга выбросов ПГ.

Согласно данной методики масса выбросов может определяться как по отдельным источникам, так и их группам, а также по предприятию в целом. Данным документом определены процессы (стационарное сжигание топлива, термическое окисление при сжигании на факелах, возникающие в результате технологических операций, авиационный

и железнодорожный транспорт, специфические технологические процессы в отраслях производства) и объём образования ПГ от которых подлежит учёту.

При расчёте прямых выбросов от стационарных источников, связанных со сжиганием топлива, учитываются данные о деятельности промышленного объекта, вид топлива и объём его сжигания за расчётный период, универсальные коэффициенты выбросов ПГ, такие как коэффициенты окисления, перевода в тонны условного топлива и перевода в энергетические единицы. При расчёте количества выбросов  $\text{CO}_2$  от этой категории источников могут использоваться такие данные, как: компонентный химический состав газообразного топлива, содержание углерода в твёрдом и жидком топливе.

Величину выбросов ПГ при факельном сжигании определяют, прежде всего, по расходу углеводородной смеси на установке, характеристике подвергающейся термическому окислению смеси и коэффициенту недожога.

Расчёт фугитивных эмиссий  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  от организованных и неорганизованных источников, производимый на участках добычи нефти и газа, их транспортировки и хранения, основывается на определении объёма углеводородного сырья, пошедшего на технологические процессы, объёмы его отведения и напрямую зависит от содержания ПГ в углеводородной смеси.

Специфические выбросы ПГ для каждой из перечисленных в методическом документе технологий связаны либо с применением топлива в технологических процессах, которые не направлены на выработку энергии, либо с переработкой жидкого и твёрдого углеродсодержащего сырья, причём, чаще всего, это высокотемпературное воздействие на карбонатное сырьё, а также частичное окисление углеводородного сырья без значимого повышения температуры.

Для отдельных производств при проведении расчётов учитывается количество углеродсодержащего сырья, расходуемого на производство единицы продукции, объём производимой продукции, доля углерода в ней и в сырье, что позволяет отследить изменение углеродсодержащего ресурса в начале и в конце определяемого периода.

Косвенные энергетические выбросы ПГ рассчитываются согласно методических указаний, разработанных и утверждённых Министерством природных ресурсов и экологии РФ от 29.06.2017 года № 330. Данные методические

указания предназначены для всех организаций, осуществляющих свою деятельность на территории РФ и в соответствии с концепцией, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 22.04.2015 года № 716-р, устанавливают порядок определения косвенных выбросов.

Министерством природных ресурсов и экологии РФ от 16.04.2015 г. за №15-р разработаны и утверждены методические рекомендации, в соответствии с которыми в субъектах РФ, помимо обязательной, предусмотрена и добровольная форма инвентаризации объёма выбросов ПГ. Данный документ включает в себя оценку выбросов ПГ для таких секторов как: энергетика, промышленные процессы и использование продукции, сельское хозяйство, отходы и учитывает только антропогенные источники выбросов ПГ.

В секторе «Энергетика» учитываются ПГ, выбрасываемые при сжигании топлива на территории субъекта для получения тепловой, электрической либо механической энергии, вне зависимости от того, какая отрасль экономики её в дальнейшем использует.

В категории «Транспорт» представлены механизмы оценки поступления  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  от транспортных средств при использовании топлива.

Выбросы, образуемые в результате промышленных процессов и неэнергетического использования ископаемого топливного углерода, оцениваются в разделе «Промышленные процессы и использование продукции».

В разделе «Сельское хозяйство» представлены методы оценки выбросов ПГ, образующихся в результате внутренней ферментации удомашнего скота; в результате сбора и хранения навоза и помёта; при выращивании риса; известковании почв; сжигании растительных остатков.

Методы оценки выбросов двуокиси углерода ( $\text{CO}_2$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ), которые образуются в результате захоронения и сжигания, представлены в разделе «Отходы».

В методике, утверждённой Приказом Минприроды РФ № 300 определены категории источников выбросов и ПГ, подлежащие обязательному учёту. Методика расчёта количества ПГ учитывает специфику технологических процессов различных источников. Например, при производстве цемента, расчёт выбросов  $\text{CO}_2$  производится на основе данных о расходе карбонатного сырья (вид и масса карбоната, степень кальцинирования и коэффициент выбросов, в том числе в составе цементной пыли, не возвращённой в обжиговую печь) и углеродсодержащих нетопливных

Таблица 2 / Table 2

Выбросы CO<sub>2</sub> в технологических процессах производства цемента  
CO<sub>2</sub> emissions from cement manufacturing processes

Сырьё Raw material	Содержание CaO в компоненте Content of CaO in component	Процент ввода компонента (т/т клинкера) Percentage of component input (tn/tn of clinker)	CaO в клинкере от компонента CaO in clinker from component	Доля CaO Share of CaO	Коэффициент выбросов CO <sub>2</sub> (EFi) для CaO CO <sub>2</sub> emission factor (EFi) for CaO	Итого ECO <sub>2</sub> , т Total, tn
Известняк Limestone	52,59	89,00	47,02	0,74	0,785	1105106,00
Глина / Clay	8,83	10,00	0,92	0,01		
Шлак доменный Blast furnace slag	40,14	34,00	13,82	0,22		
Отходы ЭСПЦ Waste	29,13	7,00	1,98	0,03		

Таблица 3 / Table 3

Выбросы CO<sub>2</sub> в результате стационарного сжигания топлива (горючий природный газ)  
CO<sub>2</sub> emissions from stationary fuel combustion (combustible natural gas)

Расход топлива, тыс. м <sup>3</sup> Fuel consumption, thousand m <sup>3</sup>	Расход топлива, ТДж Fuel consumption, TJ	Производство клинкера, т Clinker production, tn	Коэффициент перевода (NCV <sub>j</sub> ,y) т.у.т / т (тыс. м <sup>3</sup> ) Conversion factor to tons of reference fuel	Коэффициент выбросов (EFCO <sub>2j</sub> ,y) Carbon oxidation coefficient		Коэффициент окисления углерода Emission factor	ECO <sub>2</sub> , т, расчёт через тыс.м <sup>3</sup> calculated in thousand m <sup>3</sup> ECO <sub>2</sub> , tn	ECO <sub>2</sub> , т, расчёт через ТДж settlement through TJ
				тCO <sub>2</sub> /т.у.т tonn	тCO <sub>2</sub> /ТДж TJ			
148129,0	5158209115,0	1909676,9	1,154	1,59	54,4	0,995	271796,0	279204,0

материалов (вид, фактический расход и содержание углерода в составе).

Данные, полученные авторами при расчёте выбросов ПГ на примере предприятия по производству цемента с производительностью более 2000 тыс. т/год, представлены в таблице 2.

При определении прямых выбросов необходимо также учитывать объём и характеристики топлива, потребляемого для обеспечения предприятия энергией. Результаты проведённого расчёта эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферный воздух в результате сжигания топлива представлены в таблице 3.

Учитывая, что к прямым также относятся выбросы, связанные с транспортировкой, обязательным является расчёт объёма ПГ, поступающих в атмосферу в результате эксплуатации транспортных средств пред-

приятия. Объём выбросов зависит от пробега, типа и марки транспортного средства и вида топлива. В стандартных условиях автопарк промышленного предприятия представлен несколькими единицами легковых, грузовых автомобилей и автобусов. Пример расчёта выбросов ПГ в (тонны CO<sub>2</sub> = экв.) представлен в таблице 4.

Таким образом, прямые выбросы ПГ предприятия составляют 1377,092 тыс. т, в связи с чем, даже без учёта косвенных выбросов, аналогичные по производительности предприятия данной отрасли в соответствии со статьёй 7 Федерального закона от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», с 1 января 2023 г. подлежат включению в перечень регулируемых организаций, с которых будет взиматься углеродный налог при условии экспорта товарной продукции.

Таблица 4 / Table 4

Выбросы парниковых газов от транспортных средств  
Greenhouse gas emissions from vehicles

Тип транспортного средства / вид топлива Type of vehicle / type of fuel	Количество единиц, шт Number of units, pcs	Расход на 100 км Consumption per 100 km	Количество потребляемого топлива, т Amount of fuel consumed, tons	Коэффициент выбросов С (тонны С/Дж) Emission factor C (tonnes C/J)	Коэффициент для пересчета выбросов С в CO <sub>2</sub> Factor for converting C emissions to CO <sub>2</sub>	Коэффициент окисления углерода в топливе Carbon oxidation factor in fuel	Тепловорное нетто-значение (Дж/т) Calorific value net value (J/tn)	Выбросы парниковых газов (тонны CO <sub>2</sub> = экв.) Greenhouse gas emissions (tonnes of CO <sub>2</sub> = eq.)
Легковой транспорт / Passenger transport								
Kia Sorento /б	1	11,5	1,056	19,13	44/12	0,995	44,21	3,151
Toyota Camry /б	1	9,2	0,845	19,13				2,524
Nissan X-Trail/б	1	10,5	0,964	19,13				2,879
Грузовой транспорт / Freight transport								
Volvo 850 /д	2	25	2,648	19,98	44/12	0,995	43,02	16,15
Volvo fh 12 /д	4	43	4,555	19,98				55,552
MAN 18.463 /д	2	22	2,330	19,98				14,212
MAN 40.604 /б	2	41,3	3,794	19,13				22,654
ГАЗон Next /д	2	13,6	1,441	19,98				8,794
КамАЗ 65-22/д	3	44,3	4,692	19,98				42,921
Автобусы / Buses								
Воляшин 5270/д	1	35	3,708	19,98	44/12	0,995	43,02	11,305
ПАЗ 3201 /б	1	36	3,308	19,13				9,875
ИТОГО / TOTAL:								190,017

Примечание: б – бензин, д – дизель.  
Note: б – gasoline, д – diesel.

Наряду с официально утверждёнными подходами к определению объёмов выбросов ПГ от крупных его эмиттеров существуют методики, дающие возможность каждому человеку рассчитать свой углеродный след и найти способы его минимизации. Для расчёта индивидуального углеродного следа разработаны программные продукты, позволяющие учитывать физиологические потребности; потребности, связанные с обеспечением определённого уровня жизни (количество, марка, год выпуска автомобиля, количество и дальность переездов и перелётов, состав и количество потребляемых продуктов питания и т. д.). Необходимость использования таких программ для выявления возможностей снижения эмиссии ПГ на уровне индивидуума определяется степенью его осведомлённости и экологической мотивированности. На законодательном уровне это не является обязательным.

### Заключение

Таким образом, проблема расчёта и снижения углеродного следа с целью уменьшения риска глобального потепления, нашла отражение в документах, принятых на международном, национальном уровнях и на уровне отдельных организаций. Разработано множество методических подходов и методов, позволяющих рассчитать углеродный след полного жизненного цикла продукции или услуг, но актуальным остаётся вопрос полноты сведений, полученных от организаций, определения перечня данных, которыми можно пренебречь. При этом основная ответственность за объём представляемой информации и её достоверность накладывается на производителей.

### References

1. Gordeeva E.M., Pugach V.N. The Paris agreement and “Climate Neutrality”, the role of the land use sector // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 219–227 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227
2. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change Kyoto 11.12.1997 // *Byulleten mezhdunarodnykh dogovorov*. 2005. No. 5. P. 3–23 (in Russian).
3. Syrchina N.V., Bogatyreva N.N., Ashikhmina T.Ya. Phosphorite tailings from the Vyatsko-Kama deposit // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 2. P. 107–114 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-2-107-114
4. Dakieva K.Z., Tsyganov A.P., Egorina A.V., Sharipkhanova A.S., Sedelev V.A., Sadykanova G.E., Chursin A.S. The effect of work environment on the biochemical profile of workers operating at the Ust-Kamenogorsk titanium and

magnesium plant // *Toxicology and Industrial Health*. 2020. V. 36. P. 591–603. doi: 10.1177/0748233720941731

5. State and Trends of Carbon Pricing 2021. Washington, DC: World Bank, 2021. 86 p. doi: 10.1596/978-1-4648-1728-1

6. Decree of the President of the Russian Federation No. 666 of 04.11.2020 “On reducing greenhouse gas emissions” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202011040008> (Accessed: 02/14/2022) (in Russian).

7. Federal Law No. 296-FZ of July 2, 2021 “On Limiting Greenhouse Gas Emissions” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (Accessed: 14.02.2022) (in Russian).

8. Order of the President of the Russian Federation dated June 26, 2021 No. Pr-1096 “List of orders following the results of the St. Petersburg International Economic Forum” [Internet resource] <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/401294657/> (Accessed: 14.02.2022) (in Russian).

9. Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2018 No. 204 “On national goals and strategic objectives of the development of the Russian Federation for the period up to 2024” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201805070038> (Accessed: 14.02.2022) (in Russian).

10. Decree of the Government of the Russian Federation of September 24, 2019 No. 1228 “On the Adoption of the Paris Agreement” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201909240028> (Accessed: 14.05.2021) (in Russian).

11. Decree of the Government of the Russian Federation No. 3052-r dated October 29, 2021 [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111040022> (Accessed: 14.02.2022) (in Russian).

12. Decree of the President of the Russian Federation of April 19, 2017 No. 176 “On the Strategy for Environmental Security of the Russian Federation for the period up to 2025” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201704200016> (Accessed: 14.02.2022) (in Russian).

13. Decree of the President of the Russian Federation of February 8, 2021 No. 76 “On measures to implement the state scientific and technical policy in the field of environmental development of the Russian Federation and climate change” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102080007> (Accessed: 14.02.2022) (in Russian).

14. Federal Register EPA; 40 CFR Part 98; e-CFR, June 13, 2017 [Internet resource] [https://www.ecfr.gov/cgi-bin/textidx?SID=ae265d7d6f98ec86fed8640b9793a3f6&mc=true&node=pt40.23.98&rgn=div5#ap40.23.98\\_19.1](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/textidx?SID=ae265d7d6f98ec86fed8640b9793a3f6&mc=true&node=pt40.23.98&rgn=div5#ap40.23.98_19.1) (Accessed: 01.02.2022).

15. Glukhovskaya M.Yu., Evstifeeva T.A., Grivko E.V. Ecological assessment of the territory taking into account the functional heterogeneity of lands of certain categories // *Samara Scientific Bulletin*. 2019. V. 8. No. 2 (27). P. 23–28 (in Russian).

16. Glukhovskaya M.Yu., Garitskaya M.Yu., Evstifeeva T.A. Influence of anthropogenic transformation of ecosystems on the stability of regional territories // *Znanstvena misel*. 2022. V. 1. No. 63. P. 6–9 (in Russian).

## Анализ эколого-экономической эффективности функционирования регионов Приволжского федерального округа

© 2023. Е. В. Каранина, д. э. н., профессор,  
В. Н. Пугач, к. э. н., ректор,  
К. Е. Картавых, к. э. н., доцент,  
Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,  
e-mail: karanina@vyatsu.ru

В статье приведён сравнительный анализ эколого-экономической эффективности функционирования природно-социально-производственных систем (ПСПС) Приволжского федерального округа в разрезе образующих его регионов. Исследование основано на расчёте удельных показателей природоёмкости субъектов Российской Федерации (РФ), при этом учитывались три взаимосвязанных между собой фактора функционирования систем: территориальный (протяжённость, площадь субъекта); социальный (численность населения); экономический (экономические ресурсы и возможности региона). Таким образом, в процессе исследования рассчитывали показатели природоёмкости в зависимости от площади субъекта РФ, численности его населения и величины валового регионального продукта. Представлена сравнительная характеристика регионов Приволжского федерального округа (ПФО) по данным показателям, сделаны основные выводы, касающиеся эколого-экономической эффективности ПСПС ПФО. Исследование показало существенные различия в эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС регионов, входящих в состав ПФО, что свидетельствует о существенных диспропорциях в их развитии. Так, Республика Татарстан имеет один из худших показателей удельных выбросов в территориальном аспекте, но занимает лидирующие позиции по показателю удельных выбросов к единице валового регионального продукта (ВРП). Другими словами, в Республике большое внимание уделяется вопросам экологической эффективности производства. В свою очередь, Кировскую область можно охарактеризовать как регион с низким уровнем эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС, поэтому при стратегическом планировании территории необходимо особое внимание уделять внедрению современных малоотходных и безотходных технологий производства.

**Ключевые слова:** стационарные источники загрязнения, природно-социально-производственная система, природоёмкость, эколого-экономическая эффективность, валовой региональный продукт.

## Analysis of the ecological and economic efficiency of the functioning of the regions of the Volga Federal District

© 2023. E. V. Karanina ORCID: 0000-0002-5439-5912  
V. N. Pugach ORCID: 0000-0003-1220-4062  
K. E. Kartavykh ORCID: 0000-0002-4321-6974  
Vyatka State University,  
36, Moscow St., Kirov, Russia, 610000,  
e-mail: Karanina@vyatsu.ru

The article presents a comparative analysis of the ecological and economic efficiency of the functioning of the natural, social and production systems (NSPS) of the Volga Federal District in the context of its constituent regions. The study is based on the calculation of specific indicators of the environmental intensity of the subjects of the Russian Federation, taking into account three interrelated factors of the functioning of the systems: territorial (extent, area of the subject); social (population); economic (economic resources and opportunities of the region). Thus, in the course of the study, the indicators of environmental intensity were calculated depending on the area of the subject of the Russian Federation, its population and the gross regional product. The article presents a comparative characteristic of the regions of the Volga Federal District according to these indicators, the main conclusions concerning the ecological and economic efficiency of the NSPS of the Volga Federal District are made. The study showed significant differences in the ecological and economic efficiency of the functioning of the NSPS of the regions that make up the Volga Federal District, which indicates significant imbalances in their development. The Republic of Tatarstan has one of the worst indicators of specific emissions in the territorial aspect, but occupies a leading position in terms of specific emissions per unit of gross regional product. In other words, in the Republic much attention is paid to the issues of environmental efficiency of

production. The Kirov region can be characterized as a region with a low level of environmental and economic efficiency of the functioning of the NSPS, therefore, in the strategic planning of the territory, special attention should be paid to the introduction of modern low-waste and waste-free production technologies.

**Keywords:** stationary sources of pollution, natural and socio-production system, environmental intensity, ecological and economic efficiency, gross regional product.

Обострение экологических проблем обусловливает осуществление региональных исследований, целью которых является анализ современного состояния окружающей среды, решение задач качественного улучшения средо- и ресурсовосстанавливающих функций природных условий и объектов, испытывающих сегодня высокую техногенную нагрузку [1].

Цель исследования заключается в формировании теоретических положений и практических рекомендаций по обеспечению эколого-экономической безопасности региона.

### Объекты и методы исследования

В качестве объекта настоящего исследования были выбраны природно-социально-производственные системы (ПСПС) субъектов Российской Федерации (РФ), входящих в состав Приволжского федерального округа (ПФО). С точки зрения экономического потенциала ПФО в настоящее время является одним из ведущих в России [2, 3]. В состав исследуемого округа входит 14 субъектов РФ, среди них 6 республик, все они весьма сильно отличаются друг от друга и, в первую очередь, эти различия касаются социально-экономического аспекта, кроме того, существенное различие отмечается по природно-климатическим условиям, занимаемой площади, плотности населения и др.

В работе представлен анализ эколого-экономической эффективности деятельности ПСПС регионов ПФО, основанный на расчёте удельных показателей природоёмкости объекта изучения. При этом важно учесть три взаимосвязанных между собой фактора функционирования систем:

- территориальный (протяжённость, площадь субъекта);
- социальный (численность населения);
- экономический (экономические ресурсы и возможности региона).

Таким образом, первый этап исследования предполагает расчёт показателей природоёмкости в территориальном разрезе, на душу населения и к величине валового регионального продукта (ВРП) [4–6].

Второй этап предусматривает сравнение регионов ПФО по данным показателям и вы-

явление эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС ПФО.

В расчётах авторы, главным образом, опирались на методику определения удельных показателей природоёмкости системы, представленную в работе [7]. Исследование проводили на основе данных Федеральной службы государственной статистики (РОССТАТ) за 2021 год [8].

### Результаты и обсуждение

По объёму выбросов в атмосферу загрязняющих веществ Оренбургская область и Республика Башкортостан являются регионами-антилидерами на территории ПФО в исследуемом периоде [9]. Объём выбросов в этих регионах составляет около 500 тыс. т в год (табл. 1), при этом самый чистый воздух в Чувашской республике, Ульяновской и Пензенской областях, здесь выбрасывается в атмосферу загрязняющих веществ почти в 10 раз меньше.

На основе данных таблицы 1 представляется возможным составить рейтинг регионов ПФО по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу (рис. 1).

Рейтинг, представленный на рисунке 1, составлен на основе абсолютных показателей загрязняющих атмосферу веществ [8].

Важно отметить, что на протяжении последних пяти лет Республика Башкортостан (первое место в рейтинге) является регионом с самым загрязнённым воздухом. Данный факт обусловлен результатом деятельности предприятий и организаций промышленного комплекса, расположенных на территории Башкортостана и граничащих с ним областей и республик. Однако точнее оценить влияние загрязнения атмосферы на экономический потенциал регионов позволят удельные показатели природоёмкости [10–12].

**Расчёт удельных показателей загрязняющих атмосферу выбросов в территориальном разрезе (на единицу площади).** Удельный показатель выбросов загрязняющих веществ в атмосферу с учётом территориального аспекта даст возможность оценить степень воздействия загрязнения воздуха на окружающую среду в зависимости от площади территории

Таблица 1 / Table 1

Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ в разрезе регионов, входящих в состав Приволжского федерального округа (тыс. т в год)  
Emissions of atmospheric pollutants of the Volga Federal District by regions, thousand tons per year

№ п/п No.	Субъект Приволжского федерального округа Subject of Volga Federal District	Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, тыс. т в год Air emissions of pollutants, thousand tons per year
1	Кировская область / Kirov region	180,8
2	Пензенская область / Penza region	56,2
3	Пермский край / Perm region	382,7
4	Саратовская область / Saratov region	273,9
5	Ульяновская область / Ulyanovsk region	55,6
6	Республика Марий Эл / Mari El Republic	70,7
7	Республика Мордовия / The Republic of Mordovia	115,5
8	Республика Башкортостан / Republic of Bashkortostan	559,3
9	Нижегородская область / Nizhny Novgorod Region	227,6
10	Чувашская Республика / Chuvash Republic	40,2
11	Удмуртская область / Udmurt region	168,8
12	Оренбургская область / Orenburg region	495,9
13	Республика Татарстан / Republic of Tatarstan	461,7
14	Самарская область / Samara Region	335,2

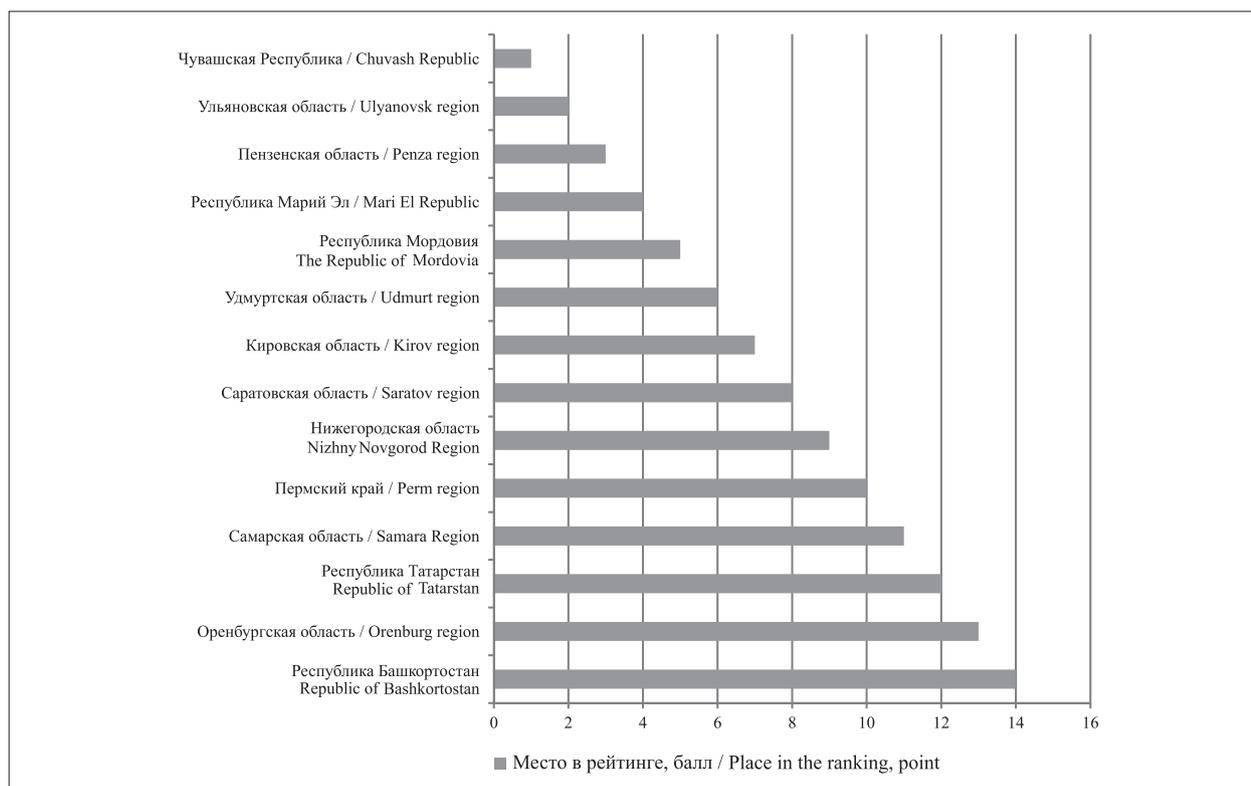


Рис. 1. Рейтинг регионов ПФО по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу  
Fig. 1. Rating of regions of the Volga Federal District in terms of emissions of air pollutants

региона ПФО. В таблице 2 представлены результаты такого расчёта.

Данные, представленные в таблице 2, демонстрируют существенные различия между регионами в значениях удельных показателей природоёмкости. Этот факт говорит о том, что

абсолютные показатели объёмов выбросов вредных и токсичных веществ не дают полного представления о влиянии природопользователей на загрязнение атмосферы, которое оказывает неблагоприятное воздействие на жизнь и здоровье человека [13, 14].

Таблица 2 / Table 2

Удельные показатели выбросов загрязняющих атмосферу веществ ПФО в разрезе регионов, т/км<sup>2</sup> в год / Specific indicators of air pollutant emissions of the Volga Federal District by regions, tons/km<sup>2</sup> per year

№ п/п No.	Субъект Приволжского федерального округа Subject of Volga Federal District	Удельные показатели выбросов загрязняющих атмосферу веществ, т/км <sup>2</sup> в год / Specific indicators of air pollutant emissions, tons/km <sup>2</sup> per year
1	Кировская область / Kirov region	1,50
2	Пензенская область / Penza region	1,30
3	Пермский край / Perm region	2,39
4	Саратовская область / Saratov region	2,71
5	Ульяновская область / Ulyanovsk region	1,50
6	Республика Марий Эл / Mari El Republic	3,02
7	Республика Мордовия / The Republic of Mordovia	4,42
8	Республика Башкортостан / Republic of Bashkortostan	3,91
9	Нижегородская область / Nizhny Novgorod Region	2,97
10	Чувашская Республика / Chuvash Republic	2,19
11	Удмуртская область / Udmurt region	4,01
12	Оренбургская область / Orenburg region	4,01
13	Республика Татарстан / Republic of Tatarstan	6,81
14	Самарская область / Samara Region	6,26

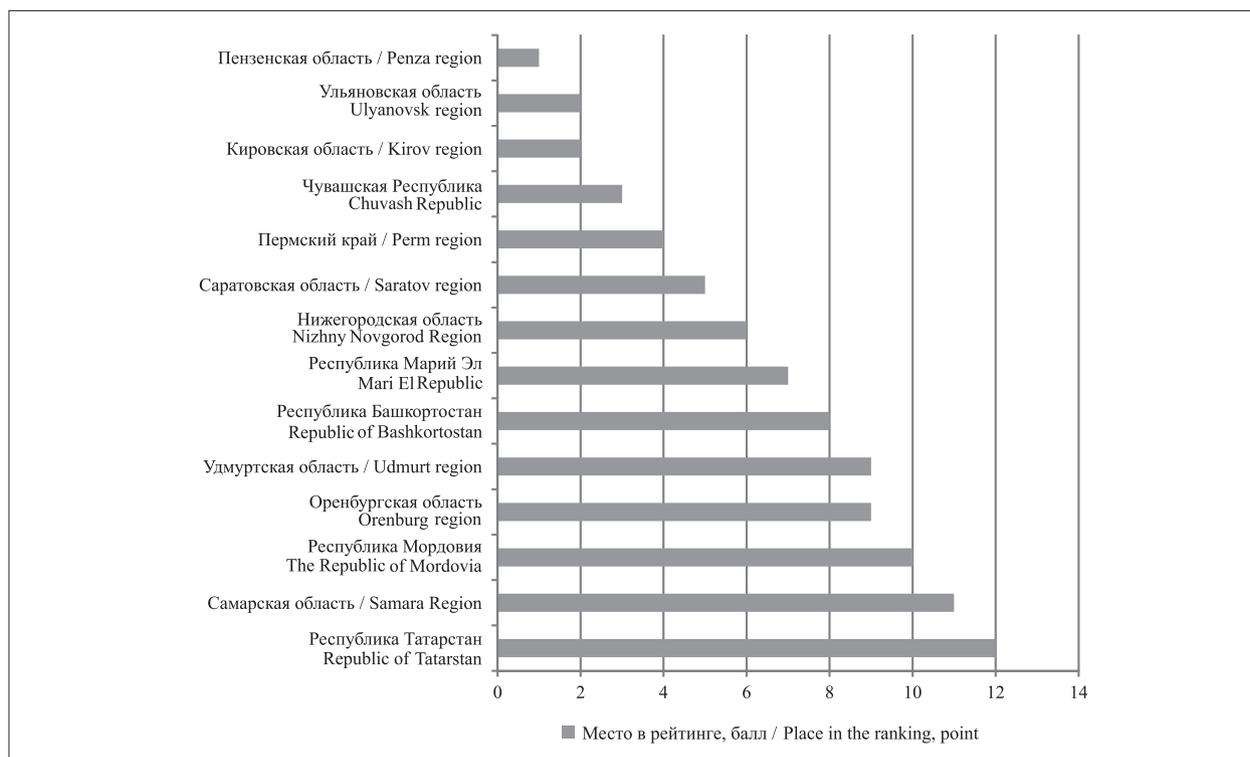


Рис. 2. Рейтинг регионов ПФО по выбросам загрязняющих атмосферу веществ с учётом площади субъекта / Fig. 2. Rating of regions of the Volga Federal District in terms of emissions of air pollutants, taking into account the area of the subject

Так, Чувашская Республика с наименьшими объёмами выбросов в абсолютных размерах обладает средними значениями удельных показателей загрязняющих атмосферу выбросов, ухудшается положение Мордовии и Марий Эл, вместе с тем, Пензенская область в данном

рейтинге выходит на 1 место (рис. 2). Кроме того, расчёты показали, что Самарская область и Республика Татарстан – это регионы с самым загрязнённым атмосферным воздухом [15].

Расчёт удельных показателей загрязняющих атмосферу веществ в социальном разрезе

Таблица 3 / Table 3

Удельные показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу субъектами ПФО, т/чел. в год / Specific indicators of emissions of pollutants into the atmosphere by subjects of the Volga Federal District, tons/person per year

№ п/п No.	Субъект ПФО / Subject of Volga Federal District	Удельные показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, т/чел. в год / Specific indicators of emissions of pollutants into the atmosphere, tons/person per year
1	Кировская область / Kirov region	0,137
2	Пензенская область / Penza region	0,041
3	Пермский край / Perm region	0,145
4	Саратовская область / Saratov region	0,109
5	Ульяновская область / Ulyanovsk region	0,044
6	Республика Марий Эл / Mari El Republic	0,102
7	Республика Мордовия / The Republic of Mordovia	0,141
8	Республика Башкортостан / Republic of Bashkortostan	0,138
9	Нижегородская область / Nizhny Novgorod Region	0,069
10	Чувашская Республика / Chuvash Republic	0,032
11	Удмуртская область / Udmurt region	0,111
12	Оренбургская область / Orenburg region	0,246
13	Республика Татарстан / Republic of Tatarstan	0,121
14	Самарская область / Samara Region	0,104

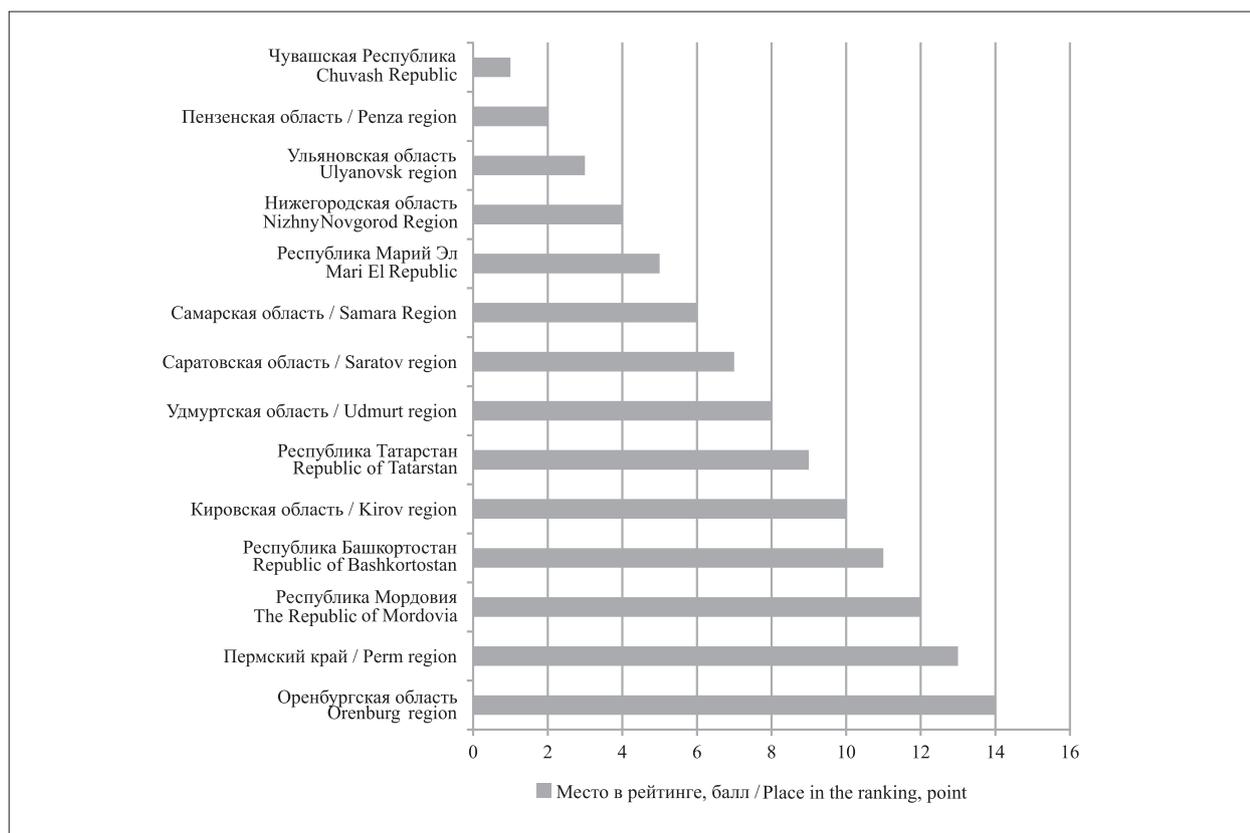


Рис. 3. Рейтинг регионов ПФО по выбросам загрязняющих атмосферу веществ с учётом численности населения региона  
 Fig. 3. Rating of regions of the Volga Federal District in terms of emissions of air pollutants, taking into account the population of the subject

(на душу населения). Расчёт удельных показателей выбросов загрязняющих атмосферу веществ по субъектам, входящим в состав ПФО, с учётом социальной составляющей позволит оценить масштабы воздействия на людей региональных негативных факторов промышленных центров. Необходимо отметить, что в данном контексте высокие показатели природоёмкости говорят о вредном воздействии загрязнения воздушной среды на население, и наоборот [16–19].

Результаты расчёта удельных показателей загрязняющих атмосферу веществ в социальном разрезе (на душу населения) представлены в таблице 3.

Согласно данным таблицы 3, удельные выбросы с учётом социальной составляющей незначительно отличаются между регионами ПФО в отличие от удельных показателей, рассчитанных в зависимости от площади территории. В лидерах по-прежнему Пензенская область (рис. 3). Высокими значениями удельных выбросов на душу населения характеризуются Оренбургская область и Пермский край [20, 21].

**Расчёт удельных показателей выбросов загрязняющих атмосферу веществ в экономическом разрезе (на единицу валового регионального продукта).** Представленные

расчёты удельных показателей загрязнения относительно площади территории, занимаемой регионами, и численности населения демонстрируют существенное влияние природопользователей как на атмосферу, так и на природу в целом, а значит, оказывают непосредственное влияние на жизнь и здоровье человека [22].

Тем не менее, важно оценить эколого-экономическую эффективность функционирования ПСПС регионов ПФО с точки зрения взаимосвязи выбросов загрязняющих атмосферу веществ и производства конечной продукции. Для этого необходимо определить отношения выбросов в атмосферу к валовому региональному продукту (ВРП), при этом, чем ниже данное значение, тем эффективнее природно-социально-производственная система.

Итоги расчётов представлены в таблице 4.

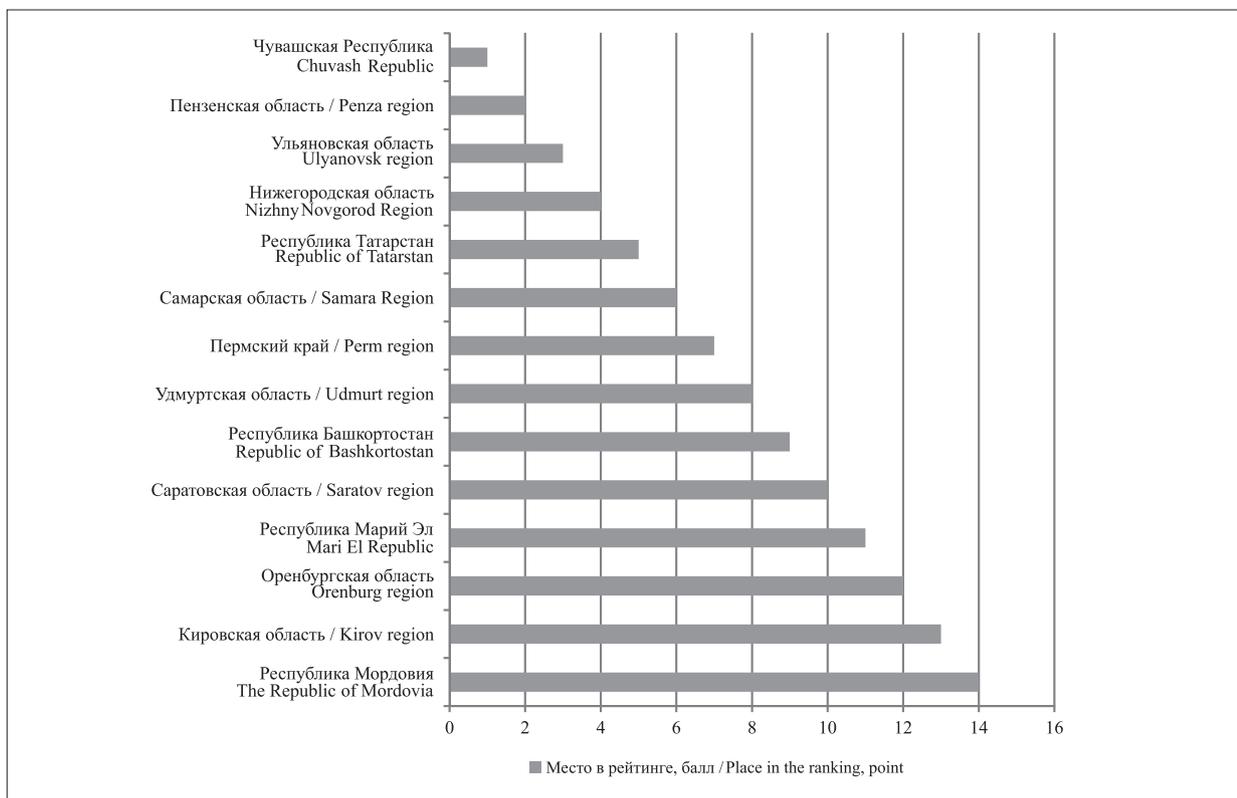
Анализируя данные таблицы 4 можно сделать вывод о том, что в Республике Татарстан, Чувашии, Пензенской, Ульяновской и Нижегородских областях экологическая составляющая превалирует в экономике в большей степени, чем, к примеру, в Кировской и Оренбургской областях (рис. 4).

**Сравнительный анализ эколого-экономической эффективности функционирования природно-социально-производственных**

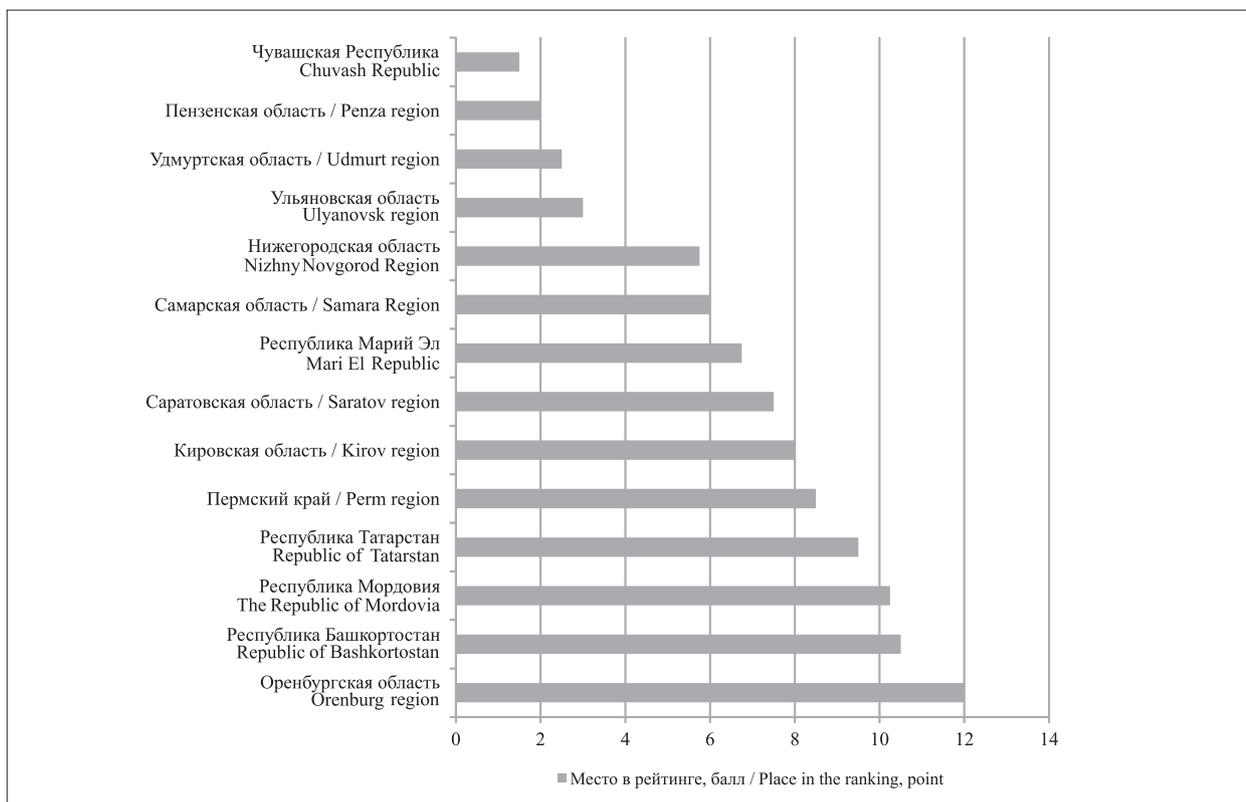
Таблица 4 / Table 4

Удельные показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу субъектами ПФО, т/млн. руб. ВРП в год  
Specific indicators of emissions of pollutants into the atmosphere by subjects of the Volga Federal District, tons / million rubles GRP per year

№ п/п No.	Субъект ПФО / Subject of Volga Federal District	Удельные показатели выбросов загрязняющих веществ в атмосферу субъектами ПФО, т/ млн. руб. ВРП в год Specific indicators of emissions of pollutants into the atmosphere by subjects of the Volga Federal District, tons / million rubles GRP per year
1	Кировская область / Kirov region	0,85
2	Пензенская область / Penza region	0,23
3	Пермский край / Perm region	0,43
4	Саратовская область / Saratov region	0,57
5	Ульяновская область / Ulyanovsk region	0,23
6	Республика Марий Эл / Mari El Republic	0,60
7	Республика Мордовия / The Republic of Mordovia	0,87
8	Республика Башкортостан / Republic of Bashkortostan	0,48
9	Нижегородская область / Nizhny Novgorod Region	0,27
10	Чувашская Республика / Chuvash Republic	0,19
11	Удмуртская область / Udmurt region	0,45
12	Оренбургская область / Orenburg region	0,79
13	Республика Татарстан / Republic of Tatarstan	0,32
14	Самарская область / Samara Region	0,36



**Рис. 4.** Рейтинг регионов ПФО по выбросам загрязняющих атмосферу веществ с ВРП региона  
**Fig. 4.** Rating of regions of the Volga Federal District in terms of emissions of air pollutants from the GRP of the subject



**Рис. 5.** Итоговый рейтинг регионов ПФО по эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС  
**Fig. 5.** The final rating of the regions of the Volga Federal District in terms of the environmental and economic efficiency of the functioning of the NSPS

систем субъектов ПФО. Показатели природоёмкости позволяют оценить эффективность функционирования ПСПС регионов, входящих в состав ПФО. Чем меньше значение природоёмкости, тем меньше загрязнение окружающей природной среды и выше эффективность системы. Каждый из рассчитанных ранее удельных показателей природоёмкости подразумевает свою дополнительную нагрузку [23]. Итоги исследования приведены на рисунке 5.

Итоговый рейтинг регионов ПФО свидетельствует о том, что некоторые регионы (Саратовская, Самарская и Кировская области, Марий Эл, Пермский край) обладают близкими по значению показателями природоёмкости. Чувашская Республика и Пензенская область являются лидерами по эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС, в то время как на нижних позициях рейтинга находятся Оренбургская область, республики Башкортостан и Мордовия.

В Республике Татарстан большое внимание уделяется вопросам экологической эффективности производства [24–26], что подтверждается достаточно низкими удельными показателями выбросов загрязняющих веществ относительно ВРП (рис. 4) и одновременно высокими удельными показателями выбросов в территориальном аспекте (рис. 2).

Кировскую область можно охарактеризовать как регион с низким уровнем эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС, поэтому при стратегическом планировании территории необходимо особое внимание уделять внедрению современных малоотходных и безотходных технологий производства.

Сравнивая результаты исследования с анализом функционирования ПСПС других авторов за предыдущие годы [7, 27] необходимо отметить, что за последние десять лет ухудшилось состояние ПСПС в республиках Мордовия и Башкортостан. Регионы не уделяют должного внимания решению экологических проблем, вследствие чего не наблюдается улучшение качества природной среды. Рост благосостояния населения приводит к увеличению количества транспортных средств, что также негативным образом сказывается на состоянии природно-социально-производственных систем субъектов.

Пензенская область и Чувашская Республика на протяжении длительного времени характеризуются хорошими показателями эколого-экономической эффективности функционирования ПСПС.

## Заключение

Исследование показало существенные различия в эколого-экономической эффективности ПСПС регионов, входящих в состав ПФО, что свидетельствует о наличии диспропорций в развитии субъектов РФ, которые необходимо нивелировать [28].

В первую очередь, диспропорции связаны с неоднородной экономической и хозяйственной структурой регионов, в результате которой прослеживается значительный уровень региональных различий. С этой точки зрения большое значение имеет наличие ресурсного потенциала. Ресурсная обеспеченность регионов также неодинакова и обуславливает различный уровень развития субъектов. В свою очередь, анализ региональных диспропорций позволяет проследить динамику регионального роста и выявить наиболее перспективные точки развития территории. Определение и выявление перспективных точек даст возможность использовать потенциал территории для развития.

Синтез информации о состоянии ПСПС ПФО способствует геоэкологическому районированию федерального округа и выявлению степени сложности экологических проблем, решение которых имеет трудноизмеримый с финансовой точки зрения экономический эффект. Важно учитывать эти проблемы при социально-экономическом планировании развития территории, чтобы избежать необратимых процессов от загрязнения окружающей среды и недопустить истощение ресурсов, уменьшение биологического разнообразия и ухудшение условий жизни человека.

*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 её применения на основе цифрового двойника».*

## Литература

1. О состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. Москва: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2021. 864 с.
2. Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Schneider Ju. Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal

spruce and peatland ecosystems // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 12–20.

3. Angelidaki I., Mogensen A., Ahring B. Degradation of organic contaminants found in organic waste // Biodegradation. 2000. V. 11. P. 377–383.

4. Садчиков А.В. Дегазация полигонов твёрдых коммунальных отходов // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 82–86.

5. Iwata H., Okada K. Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol // Environ Econ Policy Stud. 2014. V. 16. P. 325–342.

6. Новикова Е.В. О практике эколого-правовых экспериментов // Экологическое право. 2021. № 5. С. 34–40.

7. Кирюшин А.В., Резаков Г.Р., Белов А.А., Кирюшин В.А. Анализ эколого-экономической эффективности функционирования субъектов Приволжского федерального округа // Научное обозрение. 2016. № 1 [Электронный ресурс] <https://srjournal.ru/wp-content/uploads/2016/10/ID14.pdf> (Дата обращения: 30.10.2023).

8. Основные показатели охраны окружающей среды [Электронный ресурс] <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13294> (Дата обращения: 16.02.2023).

9. Ильшева Н.Н., Каранина Е.В., Кызыуров М.С. Диагностика угроз финансово-бюджетной безопасности региона // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1361–1375.

10. Karanina E.V., Selivanova M.A., Skudnova I.A. Diagnostics of economics security risks as a manifestation of management quality in the global financial markets: factors, threats, criteria and indicators of industrial and manufacturing engineering // International Journal for Quality Research this link is disabled. 2021. V. 15. No. 3. P. 941–960.

11. Сырчина Н.В., Кантор Г.Я., Пугач В.Н., Ашихмина Т.Я. Вклад углекислого газа и воды в парниковый эффект // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 218–223.

12. Гордеева Е.М., Пугач В.Н. Парижское соглашение и «климатическая нейтральность»: роль сектора «землепользование» // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 219–227.

13. Дубовик О.Л., Аверина К.Н. Значение Парижского соглашения для охраны климата: крупномасштабные планы и проблемы с их реализацией // Международное право и международные организации. 2018. № 4. С. 18–27.

14. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2000. 778 с.

15. Пещеров Ю.Г., Пещеров Г.И. Климатические аномалии в современном мире: причины и последствия // Административное право и процесс. 2020. № 9. С. 68–71.

16. Каранина Е.В., Караулов В.М., Картавых К.Е. Концептуальный подход к диагностике эколого-экономической безопасности региона // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 214–223.

17. Ашихмина Т.Я., Огородникова С.Ю. Экологический форум в городе Кирове // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 242–243.

18. Двинских С.А., Ларченко О.В., Оськина М.А. Разработка системы экологических индикаторов, отражающих водохозяйственные аспекты деятельности предприятия в свете устойчивого развития // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 1. С. 140–147.

19. Минкина А.В., Двинских С.А., Зуева Т.В. Подход к разработке интегрального показателя экологического потребления территории // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 235–240.

20. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Assessment of sustainable development of the enterprise from the standpoint of water use // Modern problems of reservoirs and their catchments. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences. 2021. V. 834. Article No. 012052.

21. Корольков М.В., Мажуга А.Г. Основы государственной политики Российской Федерации по созданию новой отрасли переработки промышленных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 6–12.

22. Кочуров Б.И., Блинова Е.А. Оценка экологических последствий использования полимерных изделий // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 4. С. 210–215.

23. Албегова А.В., Гонопольский А.М., Марьев В.А., Петухова И.Ю. Анализ проблем управления российской системой обращения с отходами производства и потребления // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 2. С. 47–54.

24. Akindele E.O., Ehlers S.M., Koop J.H.E. First empirical study of freshwater microplastics in West Africa using gastropods from Nigeria as bioindicators // Limnologia. 2019. V. 78. Article No. 125708.

25. Носкова Т.В., Лейтес Е.А., Лабузова О.М. Содержание нефтепродуктов в пробах поверхностных вод и донных отложений рек Обь и Барнаулка // Вода: химия и экология. 2018. № 10–12 (117). С. 30–35.

26. Bezmaternykh D.M. Effect of anthropogenic pollution on macrozoobenthos structure in Barnaulka River (Upper Ob Basin) // Water Resources. 2018. V. 45. No. 1. P. 89–97.

27. Zhi X., Chen L., Shen Z. Impacts of urbanization on regional nonpoint source pollution: case study for Beijing, China // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. No. 10. P. 9849–9860.

28. Chaudhry F.N., Malik M.F. Factors affecting water pollution: a review // J. Ecosyst Ecography. 2017. V. 7. No. 1. P. 1–3.

## References

1. On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2020. State report. Moskva: Ministry of Natural Resources of Russia; Moscow Lomonosov State University, 2021. 864 p. (in Russian).

2. Zagirova S.V., Mikhailov O.A., Schneider Ju. Carbon dioxide, heat and water vapor exchange in the boreal spruce and peatland ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 12–20. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-012-020

3. Angelidaki I., Mogensen A., Ahring B. Degradation of organic contaminants found in organic

- waste // *Biodegradation*. 2000. V. 11. P. 377–383. doi: 10.1023/A:1011643014990
4. Sadchikov A.V. Degassing of municipal solid waste landfills // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2017. No. 2. P. 82–86 (in Russian).
  5. Iwata H., Okada K. Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol // *Environ Econ Policy Stud*. 2014. V. 16. P. 325–342. doi: 10.1007/s10018-012-0047-1
  6. Novikova E.V. On the practice of ecological and legal experiments // *Ekologicheskoe pravo*. 2021. No. 5. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.18572/1812-3775-2021-5-34-40
  7. Kiryushin A.V., Rezakov G.R., Belov A.A., Kiryushin V.A. Analysis of the environmental and economic efficiency of the functioning of the subjects of the Volga Federal District // *Scientific review*. 2016. No. 1 [Internet recourse] <https://srjournal.ru/wp-content/uploads/2016/10/ID14.pdf> (Accessed: 30.10.2023) (in Russian).
  8. Key indicators of environmental protection [Internet resource] <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13294> (Accessed: 16.02.2023) (in Russian).
  9. Ilysheva N.N., Karanina E.V., Kyzuyurov M.S. Diagnostics of threats to regional fiscal security // *Economy of Regions*. 2021. V. 17. No. 4. P. 1361–1375 (in Russian). doi: 10.17059/ekon.reg.2021-4-22
  10. Karanina E.V., Selivanova M.A., Skudnova I.A. Diagnostics of economics security risks as a manifestation of management quality in the global financial markets: factors, threats, criteria and indicators of industrial and manufacturing engineering // *International Journal for Quality Research* [this link is disabled](#). 2021. V. 15 No. 3. P. 941–960. doi: 10.24874/IJQR15.03-16
  11. Syrchina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223
  12. 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
  13. Dubovik O.L., Averina K.N. The importance of the Paris Agreement for climate protection: large-scale plans and problems with their implementation // *Mezhdunarodnoe pravo i mezhdunarodnye organizatsii*. 2018. No. 4. P. 18–27 (in Russian). doi: 10.7256/2454-0633.2018.4.27597
  14. Matveev L.G. Atmospheric physics. Sankt-Peterburg: *Gidrometeoizdat*, 2000. 778 p. (in Russian).
  15. Peshcherov Yu.G., Peshcherov G.I. Climatic anomalies in the modern world: causes and consequences // *Administrativnoe pravo i protsess*. 2020. No. 9. P. 68–71 (in Russian). doi: 10.18572/2071-1166-2020-9-68-71
  16. Karanina E.V., Karaulov V.M., Kartavykh K.E. A 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
  17. Ashikhmina T.Ya., Ogorodnikova S.Yu. Ecological forum in the city of Kirov // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 242–243 (in Russian).
  18. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Development of a system of environmental indicators reflecting the water management aspects of the 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
  19. Minkina A.V., Dvinskikh S.A., Zueva T.V. Approach to the development of an integral index of ecological consumption of the territory // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 235–240 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-235-240
  20. Dvinskikh S.A., Larchenko O.V., Oskina M.A. Assessment of sustainable development of the enterprise from the standpoint of water use // *Modern problems of reservoirs and their catchments*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences. 2021. V. 834. Article No. 012052. doi: 10.1088/1755-1315-834-1-012052
  21. Korolkov M.V., Mazhuga A.G. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation on the creation of a new branch of industrial waste processing // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-006-012
  22. Kochurov B.I., Blinova E.A. Assessment of ecological impacts of using polymer products // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 210–215 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-210-215
  23. Albegova A.V., Gonopolskiy A.M., Maryev V.A., Petukhova I.Yu. Analysis of the problems of managing the Russian system of industrial and consumer waste management // *Theoretical and Applied Ecology*. 2015. No. 2. P. 47–54 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2015-2-042-047-054
  24. Akindele E.O., Ehlers S.M., Koop J.H.E. First empirical study of freshwater microplastics in West Africa using gastropods from Nigeria as bioindicators // *Limnologica*. 2019. V. 78. Article No. 125708. doi: 10.1016/j.limno.2019.125708
  25. Noskova T.V., Leites E.A., Labuzova O.M. The content of oil in samples of surface water and bottom sediments of the rivers Ob and Barnaulka // *Voda: himiya i ehkologiya*. 2018. No. 10–12 (117). P. 30–35 (in Russian).
  26. Bezmaternykh D.M. Effect of anthropogenic pollution on macrozoobenthos structure in Barnaulka River (Upper Ob Basin) // *Water Resources*. 2018. V. 45. No. 1. P. 89–97. doi: 10.1134/S0097807818010062
  27. Zhi X., Chen L., Shen Z. Impacts of urbanization on regional nonpoint source pollution: case study for Beijing, China // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. V. 25. No. 10. P. 9849–9860. doi: 10.1007/s11356-017-1153-1
  28. Chaudhry F.N., Malik M.F. Factors affecting water pollution: a review // *J. Ecosyst Ecography*. 2017. V. 7. No. 1. P. 1–3. doi: 10.4172/2157-7625.1000225

## Сотрудничество России и Мьянмы в области подготовки национальных кадров в высших учебных заведениях

В феврале 2023 г. в Мьянме и в России прошли мероприятия, посвящённые Бриллиантовому юбилею – 75 лет, установления дипломатических отношений с Республикой Союз Мьянма, которая получила свою независимость в 1948 г. В этом же году было создано общество дружбы с Мьянмой (Бирмой). 75 лет дружбы и сотрудничества – это солидный срок. В пользу такого взаимодействия убедились не только Россия и Мьянма, но и всё международное сообщество. В последние годы наиболее динамично развиваются связи в области подготовки национальных кадров для Республики Союз Мьянма в высших учебных заведениях России.

При поддержке Советского Союза, в Мьянме в 1957 г. был построен и открыт Янгонский технологический университет, который и по сей день остаётся ведущим вузом страны, откуда выпускаются квалифицированные инженеры. Более 200 граждан Бирмы получили в Советском Союзе высшее образование. Конечно, в динамике развития дипломатических отношений у нас были и подъёмы, и спады, были и паузы, но два десятилетия назад возобновилось интенсивное сотрудничество.

С 2001 г. Мьянма ежегодно отправляет несколько сотен младших офицеров и небольшой процент гражданских лиц в Россию для обучения в российских вузах по таким предметам, как инженерное дело, информа-

тика, медицина, авионавтика, ядерная физика и технология. С 2001 г. Россия также предоставляла возможность Мьянманским офицерам обучаться в аспирантуре российских военных и технических вузах.

Выбор России в качестве партнёра для подготовки кадров был не случаен. Поскольку учебная программа в основном преподаётся на русском языке, студенты перед отъездом проходят интенсивное языковое обучение в военных институтах Мьянмы, где работают русские преподаватели, затем следуют курсы повышения квалификации в течение четырёх-пяти лет пребывания в России. Число Мьянманцев, прошедших обучение в России за последние два десятилетия, составило почти восемь тысяч человек.

В ноябре 2022 г. на встрече главы Минобрнауки России Валерия Фалькова и Министра науки и технологий Республики Союз Мьянма Мью Теин Чжо были рассмотрены возможности расширения связей Мьянмы с российскими вузами и увеличения числа студентов из Мьянмы по пяти приоритетным областям: электронике, авиастроению, ядерной энергетике, информационным системам и материаловедению. Российская сторона готова оказывать всяческое содействие в приёме студентов из Мьянмы на специальные бюджетные места, которые будет выделять Правительство РФ.

Таблица / Table

Граждане Республики Союза Мьянма обучались в 2022 году в следующих учебных заведениях  
Citizens of the Republic of the Union of Myanmar studied in 2022 at the following educational institutions

Название заведений Name of institutions	Количество человек Amount people
НИУ «Московский институт электронной техники»	32
МГУ имени М.В. Ломоносова	22
РХТУ имени Д.И. Менделеева	17
НИУ «МЭИ»	12
РУДН	10
НИЯУ «МИФИ»	9
МАИ (национальный исследовательский университет)	9
МГИМО (университет) МИД РФ	6
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет	6
МФТИ (национальный исследовательский университет)	6
ИТМО Национальный исследовательский университет	6
МГТУ имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)	5
НИТУ «МИСиС»	5

Название заведений Name of institutions	Количество человек Amount people
Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе	4
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет	4
МГТУ «СТАНКИН»	4
Тульский государственный университет	2
НИУ «Высшая школа экономики»	1
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого	1
Финансовый университет при Правительстве РФ	1
Курский государственный медицинский университет	1

В 2022/23 учебном году по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры в образовательных организациях высшего образования обучалось 163 гражданина Республики Союза Мьянма, из них 8 граждан – в пределах квоты Правительства РФ. В 2022/23 учебном году освоено 13 мест в соответствии с изменениями второй редакции плана приёма. На 2023/24 учебный год планируется выделить 20 квот для студентов из Мьянмы.

Обучение в пределах квоты в 2022/23 учебном году ведётся по следующим специальностям: аппаратное и программное обеспечение приёмников глобальных спутниковых навигационных систем; туризм; языкознание и литературоведение; экономика; управление персоналом; биотехнология; математическое обеспечение и администрирование информационных систем; мехатроника и робототехника.

При содействии Минобрнауки России идёт развитие прямых связей между образовательными организациями высшего образования наших стран. На сегодняшний день между российскими и мьянманскими университетами действует 14 документов о сотрудничестве.

В данном направлении с мьянманскими университетами Янгона, Дагона, а также с Янгонским технологическим университетом активно сотрудничают НИУ «Московский институт электронной техники», НИУ «Московский авиационный институт», НИУ «МЭИ».

Среди российских вузов и научных организаций научно-техническое сотрудничество с партнёрами из Мьянмы также ведут следующие организации: Российский университет транспорта (РУТ МИИТ) с Министерством образования и науки Мьянмы; Юго-Западный государственный университет с компанией «Sky Aviator Company» по направлению исследований «физическое материаловедение».

Кроме того, такие научные организации, как Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова выражают интерес в развитии сотрудничества с мьянманскими партнёрами в сфере сельскохозяйственных наук.

На полях третьего заседания Межправительственной Российско-Мьянманской комиссии по торгово-экономическому сотрудничеству прошло подписание соглашения об открытии филиала Дальневосточного федерального университета (далее – ДВФУ) в Мьянме. Во время участия лидера Республики Союз Мьянма Мин Аунг Хлайн в Восточном экономическом форуме во Владивостоке между руководством вуза и главой делегации Мьянмы обсуждалась возможность развития образовательного сотрудничества. А спустя три месяца упорной работы подписано соглашение о создании филиала ДВФУ в Нейпидо.

Главная задача филиала – подготовка национальных кадров Республики Союз Мьянма в области информационных технологий и медицины, который станет первым российским и единственным иностранным лицензированным филиалом на территории Мьянмы.

Научно-техническое сотрудничество России и Мьянмы реализуется в рамках Совместной исследовательской программы «Научное и инновационное пространство Восточной Азии» (e-Asia Joint Research Programme, e-Asia JRP). Целью e-Asia JRP является поддержка международных совместных исследований в восточноазиатском регионе, а также обмен и обучение исследователями кадрами в рамках семинаров и других

мероприятий. Исследовательские проекты отбираются в рамках конкурса и впоследствии поддерживаются в соответствии с механизмом финансирования.

В 2018 г. в рамках e-Asia JPR был поддержан проект по направлению «Материаловедение и нанотехнологии» с участием исследователей из России, Мьянмы и Филиппин. Тематика проекта – «Фундаментальное исследование физических свойств монокристаллических нанопроводов и наночастиц для био-нано-зондирования». Российский участник – Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, участник из Мьянмы – Университет Панглонг. Проект реализован в течение – 2018–2022 гг.

Также в 2021 г. по результатам конкурса в направлении «Здравоохранение» был поддержан проект: «Сотрудничество России, Вьетнама и Мьянмы в разработке новых таргетных агентов в отношении вирусных и паразитарных инфекций на основе растительных метаболитов». Российским участником данного проекта является Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, участником из Мьянмы – Рангунский университет.

22 ноября 2022 г. по приглашению Института стратегических исследований Thayninga в Республику Союз Мьянма прибыла делегация из России в рамках конференции «Russia-Myanmar: expanding educational and humanitarian opportunities». В состав делегации вошли представители ведущих российских университетов и профильных организаций в сфере публичной дипломатии, образования и науки.

23–24 ноября 2022 г. по инициативе мьянманской стороны российскую делегацию на высоком уровне приняли Министр иностранных дел РСМ господин Вунна Маунг Лвин (U Wunna Maung Lwin), Министр международного сотрудничества РСМ господин Коу Коу Хлайн (U Ko Ko Hlaing) и Министр образования РСМ доктор Ньюн Пхей (Dr. Nyunt Phay). Руководство министерств отметило ряд приоритетных направлений в развитии взаимодействия с Россией. Обсуждались наиболее востребованные вопросы двустороннего гуманитарного сотрудничества: увеличение бюджетных квот для студентов из Мьянмы и, с другой стороны, наращивание потока студентов, проходящих обучение на платной основе; расширение программ студенческого обмена, а также повышение квалификации для дей-

ствующих преподавателей (TOT, training of teachers); организация спецкурсов для кадровых мьянманских дипломатов.

В настоящее время в РСМ сформирован существенный запрос на программы изучения русского языка. Подготовка русскоговорящих кадров также будет благоприятствовать увеличению двусторонних туристических потоков. Мьянманская сторона информировала о планах реализации комплексных программ по учреждению новых высших учебных заведений в РСМ и отметила уже установленные связи с университетами Приморского края, Новосибирской области, Санкт-Петербурга и Москвы.

РХТУ имени Д.И. Менделеева является многолетним надёжным партнёром Мьянмы в вопросах подготовки кадров в области химии и химической технологии. С 2001 г. в РХТУ подготовлено более 770 специалистов в области химии и химической технологии.

Во время визита в августе 2018 г. главнокомандующий Вооружёнными силами Мьянмы, старший генерал Мин Аунг Хлайн отметил, что уровень подготовки остаётся традиционно высоким и Мьянманская сторона заинтересована в продолжении сотрудничества. Военный атташе Республики Союз Мьянма генерал Чжо Со Мо в марте 2021 г. отметил огромный вклад РХТУ имени Д.И. Менделеева в деле подготовки научных кадров для Мьянмы.

В последние десятилетия в РХТУ активно ведётся обучение магистров и аспирантов в области экологии и защиты окружающей среды. Направления водоподготовки, водоочистки, защиты окружающей среды и рационального использования природных ресурсов крайне актуальны для Мьянмы и в настоящее время.

В 1967 г. с помощью специалистов из СССР завершено строительство крупного ирригационного узла Чемаутаун, реконструирован и расширен оловянно-вольфрамовый рудник в Мочи, введён в эксплуатацию гипсовый карьер в Схипо. Инженерами из Советского Союза были разработаны для Мьянмы проекты мелиорации земель в дельте реки Иравади, гидротехнического и ирригационного комплекса на реке Ситаунг.

Сегодня Мьянма переживает быстрый экономический рост и вступает на путь большой индустриализации. Экономический рост идёт рука об руку с масштабным процессом урбанизации, например в регионе Янгон, население которого в настоящее время оценивается в 7 млн человек. Урбанизацию испытают

и другие города Мьянмы, и, в то же время, водоснабжение в сельских районах также остро нуждается в модернизации. Таким образом, Мьянма обладает большим потенциалом в области обеспечения экологической безопасности населения, решении проблем питьевого водоснабжения, водоочистки, очистки сточных вод, улучшения городского дренажа и обращения с твёрдыми отходами.

В РХТУ имени Д.И. Менделеева особое внимание уделяется проведению фундаментальных, поисковых и прикладных научно-исследовательских работ в области инжиниринга высокоинтенсивных энергоресурсо-эффективных химических технологий и экологически безопасных химико-технологических систем по приоритетным направлениям, принятым решением XXI Менделеевского съезда в 2019 г.

Накопленный опыт команды РХТУ имени Д.И. Менделеева в области водоочистки и водоподготовки (кафедра технологии неорганических материалов и электрохимических процессов; кафедра промышленной экологии; кафедра мембранной технологии; технопарк «Экохимбизнес-2000+»; Мембранный центр РХТУ имени Д.И. Менделеева; сеть малых инновационных предприятий), а также созданная в РХТУ имени Д.И. Менделеева в 2020 г.

магистерская программа «Технологии обезвреживания жидких техногенных отходов и водоподготовка» по направлению подготовки 18.04.01 «Химическая технология», позволили выполнить и подготовить к защите работы студентов и аспирантов из Мьянмы в этой области исследования.

Мы надеемся, что полученные в России теоретические знания, опыт проведения научных исследований, участие в прикладных внедрениях передовых разработок позволят нашим выпускникам, вернувшись в Мьянму, применить их на практике на благо развития своей Родины. Первые студенты давно вернулись в Мьянму и теперь уже они, на основе полученных в России знаний, учат более молодое поколение.

*Хейн Тху Аунг, к. т. н., докторант,  
Д. О. Лемешев, к. т. н., декан,  
А. В. Моржухин, начальник управления-  
международных проектов и программ,  
А. В. Колесников, к. т. н., доцент, и. о.  
заведующего кафедрой, В. А. Бродский, к. т. н.,  
доцент, И. В. Ерёмин, к. э. н., проректор  
по развитию образовательных программ и  
международной деятельности, РХТУ имени  
Д. И. Менделеева*

## К юбилею Татьяны Анатольевны Трифоновой



Трифорова Татьяна Анатольевна, известный учёный, педагог, почётный работник высшей школы, доктор биологических наук, профессор факультета Почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова, заведующая кафедрой биологии и экологии Владимирского государственного университета (ВлГУ), заслуженный деятель науки РФ.

Татьяна Анатольевна является выпускницей биолого-почвенного факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, где она закончила аспирантуру и защитила кандидатскую диссертацию по биологическим наукам. Научные интересы Татьяны Анатольевны связаны с развитием бассейнового подхода в почвенно-экологических исследованиях с использованием данных дистанционного зондирования, изучением трансформации природно-антропогенных экосистем под влиянием различных факторов. Татьяна Анатольевна является ученицей и последо-

вательницей ведущего деятеля отечественной науки, академика РАН Глеба Всеволодовича Добровольского, который был её неизменным руководителем при подготовке кандидатской и докторской диссертаций.

Одной из ярких страниц научной деятельности Татьяны Анатольевны стала работа в Академии наук Армении в должности зав. сектором дистанционного зондирования горных геосистем. Ею была сформулирована концепция формирования горного водосборного бассейна как саморазвивающейся природной геосистемы. Работала в составе научного коллектива по оценке экологических последствий Спитакского землетрясения, за что получила Благодарность правительства СССР.

В 1994 году она создала и возглавила кафедру экологии Владимирского государственного университета, при её активном содействии на кафедре были открыты специальности «биология» и «экология». С 2005 г. Татьяна Анатольевна работает на кафедре географии почв факультета почвоведения МГУ в должности профессора и продолжает заведовать кафедрой во ВлГУ.

Татьяна Анатольевна проявляет себя не только как талантливый учёный, но и как успешный организатор научного и образовательного процесса. На кафедре экологии и биологии ВлГУ ей удалось собрать коллектив единомышленников. Кафедра развивается, открываются новые учебные направления и специальности бакалавриата и магистратуры, работает аспирантура. Привлекая к работе над научными проблемами в области экологии как состоявшихся учёных, так и соискателей учёных степеней Татьяна Анатольевна создала свою научную школу. Своим энтузиазмом и научными идеями она щедро делится с молодыми учёными и даёт им старт в большую науку.

Под руководством Татьяны Анатольевны состоялись защиты 24 кандидатских и 4-х докторских диссертаций. Её ученики работают в разных точках нашей огромной страны и за рубежом, сохраняя со своим научным руководителем прекрасные человеческие отношения и научные контакты.

Татьяна Анатольевна возглавляла диссертационный совет по специальности экология, биологические науки (2010–2014 гг.), а затем стала зам. председателя. Совет успешно работал, в нём прошли защиты более 60 соискателей со всей нашей страны и ближнего зарубежья.

С 1999 г. Татьяна Анатольевна является членом экспертного совета ВАК по биологическим наукам, экспертом РФФИ, экспертом РНФ, председателем ГАК по направлению «Экология и природопользование» МАИ (НИУ), член редколлегии пяти отечественных и зарубежных научных журналов, в том числе журнала «Теоретическая и прикладная экология». Татьяна Анатольевна руководит крупными научно-исследовательскими проектами, поддержанными грантами РФФИ, РНФ и Минобрнауки.

С активной научной деятельностью Трифонова Т.А. успешно совмещает преподавательскую работу в МГУ и ВлГУ. Она разработала и читает общие лекционные курсы как на факультете Почвоведения МГУ, так и на биологическом и географическом факультетах. Её занятия всегда увлекательны и интересны.

Татьяна Анатольевна является автором более 200 научных статей и учебных пособий, принимает активное участие в работе многочисленных Всероссийских и международных конференций. Она зарекомендовала себя ответственным, креативным организатором традиционной международной научно-практической конференции «Экология речных бассейнов», которая уже в 11-ый раз проходит на базе ВлГУ.

Трифорова Татьяна Анатольевна неоднократно награждалась почётными грамотами, благодарственными письмами и другими наградами: нагрудным знаком «Почетный работник высшей школы», почётной грамотой Президиума ВАК «За большие заслуги в работе по аттестации научных и научно-педагогических кадров», почётным дипломом РФФИ за многолетнюю работу в составе Экспертного совета по отделению «Науки о Земле». Высшей её наградой явилась государственная награда «Заслуженный деятель науки РФ».

Татьяна Анатольевна – профессионал своего дела, учёный с большой буквы, мудрый руководитель и наставник, прекрасный человек. От всей души коллеги поздравляют Татьяну Анатольевну с юбилеем. Желаем ей здоровья и творческих успехов!

*Сотрудники Владимирского государственного университета,  
редколлегия журнала «Теоретическая и  
прикладная экология»,  
главный редактор Т.Я. Ашихмина*

## Экологический форум в г. Кирове

14–15 ноября 2023 г. в Вятском государственном университете (ВятГУ) прошёл V Всероссийский научно-практический форум «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии» (см. цв. вкладки VII, VIII). 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. География участников Форума расширяется с каждым годом. Программа V Всероссийского научно-практического форума включала 184 доклада. Материалы поданы от учёных из 75 вузов и НИИ нашей страны, Республики Беларусь и Узбекистана, из 41 города России и Ближнего Зарубежья. На участие в экологическом форуме заявилось 426 участников. От ФГУП «ФЭО» в Форуме приняли участие А.С. Петрова – директор по коммуникациям, Е.М. Карунская – начальник отдела по коммуникациям, А.Н. Громова – руководитель пресс-службы и О.В. Арнаутова – начальник отдела коммуникаций АО Росатом Гринвейн.

Работа форума началась 14 ноября с проведения очного этапа V Всероссийского молодёжного конкурса научно-исследовательских проектов «Разработка методов и технологий обращения с отходами производства и потребления, организация экологического мониторинга». В конкурсную комиссию было представлено 42 проекта, которые поступили из 8 регионов России и из Узбекистана. Молодые исследователи представляли свои проекты конкурсному жюри. 23 победителя 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», которая посвящена 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 четырёх вузов, входящих в Консорциум «Передовые ЭкоТехнологии»: Вятского государственного

университета, Удмуртского государственного университета, Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А., Курганского филиала РАНХиГС. Игра «Zero Waste» проходила в очном формате и включала два тура: защиту кейсов, которые были подготовлены в форме домашнего задания и интеллектуальную игру «BrainShaker». Команды-победители и их наставники награждены дипломами, благодарственными письмами, ценными призами ФГУП «ФЭО».

В рамках Всероссийского экологического форума в этот же день состоялось открытие V Всероссийской научно-практической конференции «Технологии переработки отходов с получением новой продукции», в рамках которой состоялась пленарная сессия «Передовые технологии». Конференцию открыл и поприветствовал её участников проректор ВятГУ С.Г. Литвинец, с приветствием выступили директор по коммуникациям ФГУП «ФЭО» А.С. Петрова, министр охраны окружающей среды Кировской области Т.Э. Абашев, проректор по развитию образовательных программ и международной деятельности РХТУ им. Д.И. Менделеева И.В. Ерёмин, вице-президент ВТТП Кировской области Л.И. Перминов. С пленарными докладами выступили: директор по коммуникациям ФГУП «ФЭО» А.С. Петрова, директор филиала «Эко-технопарк «Мирный» А.Г. Свирский, а также учёные из вузов и НИИ городов Москвы, Санкт-Петербурга, Перми, Саратова, Сыктывкара, Пскова, Иркутска, Ижевска и Кирова. Кроме пленарной сессии в рамках данной конференции работало 5 секций: «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», «Правовые основы обращения с отходами».

15 ноября начала свою работу XXI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем». С пленарными докладами выступили: зав. отделом почвоведения, к. б. н., доцент Е.М. Лаптева и зав. отделом лесобиологических проблем севера, д. б. н., доцент, С.В. Загирова (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН); ведущий научный сотрудник, к. х. н., доцент М.А. Шумилова (Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН);

профессор, д. б. н. И.Л. Бухарина и доцент, к. б. н. А.Н. Журавлева (Удмуртский государственный университет); доцент, к. т. н. И.Г. Русскова (ВШ ТБ ФГАОУ ВО «СПбПУ Петра Великого»); доцент, к. б. н. С.В. Пестов, с. н. с, к. т. н. Г.Я. Кантор (Институт биологии Коми НЦ УрО РАН и ВятГУ). На данной конференции работали секции: «Экологический мониторинг природных и природно-техногенных систем», «Химия и экология почв», «Экология микроорганизмов, растений и животных».

По итогам работы Форума опубликованы материалы в сборниках конференций и размещены на сайте: <http://envjournal.ru/ecolab/knf.php>.

*Т. Я. Ашихмина, зам. председателя оргкомитета Форума, Вятский государственный университет, ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, М. Л. Сазанова, ответственный секретарь Форума, Вятский государственный университет, ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН*

### «Менделеевская экосистема» расширяет горизонты

Ключевым направлением развития новой отрасли обращения с отходами производства и потребления, формируемой сегодня в России, является подготовка кадров нового образца в сфере промышленной экологии. В составе федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» национального проекта «Экология» разработана программа «Престиж работы в промышленной экологии», одним из ключевых мероприятий которой является образовательный проект для учащихся 8–11 классов средних общеобразовательных учреждений «Менделеевские классы», реализуемый при поддержке Госкорпорации «Росатом» и вузов Федерального научно-образовательного консорциума «Передовые ЭкоТехнологии». В ходе обучения ученики «менделеевских классов» углублённо изучают химию и математику, слушают лекции преподавателей высшей школы, разрабатывают проекты на различные темы в сфере экологии. Полученные знания школьники применяют на практике в ходе научно-исследовательской программы «Менделеевская экологическая экспедиция». Всё это формирует «Менделеевскую экосистему», объединяющую учащихся школ, студентов и педагогов для формирования кадрового потенциала в сфере промышленной экологии.

**Кадры для новой отрасли.** Создаваемая в России отрасль обращения с отходами производства и потребления I и II классов опасности базируется на принципах экономики замкнутого цикла и устойчивого развития, опирается на передовые технологии и цифровые решения, что требует большого числа высококвалифицированных кадров широкого профиля – от промышленных экологов до IT-специалистов. Очевидно, что подготовка

такого рода кадров должна начинаться со школьной скамьи и иметь бесшовный путь – от школы до предприятия.

Внося свой вклад в этот процесс, Госкорпорация «Росатом» и Федеральный экологический оператор инициировали включение средних школ территорий реализации Федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» в образовательный проект «Менделеевские классы», разработанный Российским химико-технологическим университетом им. Д.И. Менделеева.

Основная задача проекта – раннее профессиональное ориентирование школьников в сфере промышленной экологии через углублённое изучение химии и математики и взаимодействие с вузами. В перспективе выпускники «менделеевских классов» поступают в вузы Федерального научно-образовательного консорциума «Передовые ЭкоТехнологии» и, получив специальность, устраиваются работать на предприятия «Росатома».

Федеральный научно-образовательный консорциум «Передовые ЭкоТехнологии» был создан в 2020 г. по инициативе Госкорпорации «Росатом» для решения задач национального проекта «Экология». В состав консорциума входят ведущие вузы регионов по реализации федерального проекта «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности», в том числе Вятский государственный университет.

Одним из ключевых мероприятий образовательной программы является проектная деятельность. Школьники совместно со студентами и педагогами разрабатывают проекты, направленные на решение проблем загрязнения атмосферы и почвы, ликвидации

накопленного экологического вреда, альтернативной энергетики, переработки отходов и др.

Применить свои знания на практике школьники и студенты могут в ходе Менделеевских экологических экспедиций, которые позволяют сформировать у молодых ребят опыт научно-исследовательской деятельности, провести полевые и лабораторные работы в области экологии.

**Менделеевская экологическая экспедиция.** Третья «Менделеевская экологическая экспедиция» прошла с 17 по 22 сентября 2023 г. (см. цв. вкладки V, VI). В этом году территорией исследований юных экологов стал Южный Урал. Участниками экспедиции традиционно являются ученики и педагоги образовательного проекта «Менделеевские классы», студенты и преподаватели вузов Федерального научно-образовательного консорциума «Передовые ЭкоТехнологии». Экспедиция организована сетью информационных центров по атомной энергии при поддержке Федерального экологического оператора (предприятие Госкорпорации «Росатом»).

В программу мероприятий Менделеевской экологической экспедиции входят лабораторные исследования на территории промышленных и природных объектов, проф-ориентационные посещения предприятий, высших учебных заведений, экскурсии, лекции и мастер-классы на широкий спектр тем в сфере экологии. Ключевым событием каждой экспедиции является посещение объектов, на которых Федеральный экологический оператор проводит работы по ликвидации накопленного экологического вреда.

Южный Урал порадовал участников насыщенной экскурсионной программой. Ребята посетили Информационный центр по атомной энергии Челябинска, Государственный исторический музей Южного Урала, дом-музей Курчатова, интерактивный музей ПО «Маяк» в Озерске, Центр экологического мониторинга Челябинской области.

Практические исследования участники проводили под чутким руководством своих педагогов в национальном парке «Таганай» и университетских лабораториях.

Особое внимание в программе уделено устранению последствий антропогенного воздействия деятельности человека на окружающую среду. Участники экспедиции посетили площадку бывшей Челябинской городской свалки – объекта, рекультивированного Федеральным экологическим оператором в 2019–2021 гг. Комплекс работ включал реформирование свалочного материала, устройство рекультивационного экрана, создание системы сбора и очистки фильтрата и поверхностного стока, а также системы сбора и утилизации биогаза. Проведенные мероприятия позволили улучшить качество жизни более 1 млн. человек. Будущие экологи, увидев результаты работы Федерального экологического оператора, смогли убедиться в важности и перспективах их будущей профессии. По итогам посещения бывшей свалки ребятам было предложено разработать направления трансформации этой территории из объекта накопленного экологического вреда в точку притяжения горожан в дальнейшем.

В рамках предыдущих экспедиций «менделеевцы» посетили территорию бывшего Байкальского целлюлозно-бумажного комбината в Иркутской области и полигон промышленных отходов «Красный Бор» в Ленинградской области.

Формируя собственный опыт научно-исследовательской деятельности, включая полевые и лабораторные работы на уникальных объектах, участники могут убедиться в важности бережного и рационального отношения к природным ресурсам, увидеть к каким печальным последствиям может привести легкомысленное отношение к окружающей среде и почувствовать себя настоящим экологом, чтобы в будущем выбрать экологию приоритетной для себя траекторией профессионального развития.

*А. Н. Громова,  
руководитель пресс-службы ФГУП «ФЭО»  
(предприятие Госкорпорации «Росатом»)*

# Менделеевская экологическая экспедиция на Южный Урал, 2023 г.



## Менделеевская экологическая экспедиция на Южный Урал, 2023 г.



**V Всероссийский научно-практический форум  
«Утилизация отходов производства и потребления:  
инновационные подходы и технологии»**



# V Всероссийский научно-практический форум «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии»



# V Всероссийский научно-практический форум «Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии» Интеллектуальная игра «Zero Waste»



# Индекс ПС248



ISSN 1995-4301



9 771995 430004