

Научный журнал  
Издается с 2015 г.

ISSN 2410-8553

Периодичность выхода журнала с 2021 года **2 номера в год**  
(до 2021 года журнал выходил 1 раз в год).

В журнале «Антропогенная трансформация природной среды» представлены оригинальные и обзорные статьи, краткие сообщения по геоэкологическим проблемам, научные результаты исследований взаимодействия человека и природы, соответствующие трем тематическим разделам:

- **Трансформация природной среды** ИЛИ **Pollution** (по классификации Scopus)
- **Сохранение природной среды** ИЛИ **Nature and Landscape Conservation** (по классификации Scopus)
- **Палеоэкология и Палеогеография** ИЛИ **Earth-Surface Processes** (по классификации Scopus)

Предпочтение отдается статьям на геоэкологической, географической, биогеоэкологической, биогеохимической, биологической основе.

Журнал представляет интерес для исследовательских институтов; учебных заведений, дающих высшее профессиональное образование и осуществляющих научную деятельность; научных библиотек и ученых, работающих в области геоэкологии, экологии, сохранения и восстановления природы.

#### Журнал индексируется в системах:

Российский индекс научного цитирования

#### ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Сергей Алексеевич Бузмаков – заведующий кафедрой биогеоэкологии и охраны природы Пермского государственного национального исследовательского университета, профессор, доктор географических наук.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Валентина Сергеевна Артамонова – ведущий научный сотрудник Института почвоведения и агрохимии СО РАН, доктор биологических наук;

Александр Николаевич Бармин – декан геолого-географического факультета; заведующий кафедрой экологии, природопользования, землеустройства и безопасности жизнедеятельности Астраханского государственного университета, профессор, доктор географических наук;

Елена Ильична Голубева – профессор по кафедре рационального природопользования географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор, доктор биологических наук;

Дарья Олеговна Егорова – старший научный сотрудник лаборатории микробиологии техногенных экосистем Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, доцент, доктор биологических наук;

Маргарита Михайловна Редина – профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции Института экологии РУДН имени Патриса Лумумбы, доцент, доктор экономических наук;

Павел Юрьевич Санников – доцент кафедры биогеоэкологии и охраны природы Пермского государственного национального исследовательского университета, кандидат географических наук;

Андрей Владимирович Соромотин – директор научно-исследовательского института экологии и рационального использования природных ресурсов при Тюменском государственном университете, профессор, доктор биологических наук;

Юрий Александрович Федоров – заведующий кафедрой физической географии, экологии и охраны природы Института наук о Земле Южного федерального университета, профессор, доктор географических наук;

Александр Петрович Хаустов – ведущий специалист, профессор департамента экологической безопасности и менеджмента качества продукции Института экологии РУДН имени Патриса Лумумбы, профессор, доктор геолого-минералогических наук;

Вера Павловна Чижова – ведущий научный сотрудник кафедры физической географии и ландшафтоведения географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, кандидат географических наук;

Андрей Николаевич Шихов – профессор кафедры картографии и геоинформатики Пермского государственного национального исследовательского университета, доцент, доктор географических наук;

Людмила Сергеевна Шумиловских – научный сотрудник кафедры палинологии и динамики климата Гёттингенского университета им. Георга-Августа (Германия), кандидат биологических наук.

**Учредитель:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

**Адрес учредителя:** 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15

**Адрес редакции:** 614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15, географический факультет, кафедра биогеоэкологии и охраны природы

© Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2024



Scientific journal

ISSN 2410-8553

Published since 2015

The frequency of the journal's publication from 2021 is **2 issues per year** (until 2021 the journal was published once a year).

The journal «**Anthropogenic Transformation of Nature**» presents original papers, review papers and short communications articles addressed to geocological problems, scientific questions of interaction of Man and Nature. All material in the Journal should correspond to three thematic sections:

- **Nature and Landscape Conservation** (Scopus classification)
- **Pollution** (Scopus classification)
- **Earth-Surface Processes** (Scopus classification)

Articles on a geocological, geographical, ecosystem, biogeochemical, biological basis are preferred.

The journal is of interest to research institutes; educational institutions providing higher professional education and carrying out scientific activities; scientific libraries and scientists working in the field of geocology, ecology, conservation and restoration of nature.

**The journal is indexed in systems:**

Russian Science Citation Index

**EDITOR-IN-CHIEF**

Sergei A. Buzmakov      Chair of the Department of Biogeocenology and Nature Protection, Perm State University, Doctor of Sciences in Geography.

**EDITORIAL BOARD**

Valentina S. Artamonova      Leading Scientific Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences – Russia), Doctor of Sciences in Biology.

Alexander N. Barmin      Dean of the Faculty of Geology & Geography; Chair of Ecology, Nature & Land Management & Safe Vital Activities Department, Astrakhan State University, Doctor of Sciences in Geography;

Elena I. Golubeva      Professor of the Environmental Management Department, Lomonosov Moscow State University, Doctor of Sciences in Biology;

Darya O. Egorova      Senior Scientific Researcher of the Laboratory of Technogenic Ecosystems Microbiology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms (Ural Branch of Russian Academy of Sciences), Doctor of Sciences in Biology;

Margarita M. Redina      Professor of the Department of Environmental Safety and Product Quality Management of the Institute of Ecology of the Patrice Lumumba People's Friendship University, Doctor of Economic Sciences;

Pavel Yu. Sannikov      Associate Professor of the Department of Biogeocenology and Nature Protection, Perm State University, PhD in Geography;

Andrey V. Soromotin      Director of the Research Institute of Ecology and Natural Resource Management, University of Tyumen, Doctor of Sciences in Biology;

Yuri A. Fedorov      Chair of the Department of Physical Geography, Ecology and Nature Conservation, Institute of Earth Sciences, Southern Federal University, Doctor of Sciences in Geography;

Alexander P. Khaustov      Leading specialist, Professor of the Department of Environmental Safety and Product Quality Management of the Institute of Ecology, Patrice Lumumba People's Friendship University, Doctor of Sciences in Geology;

Vera P. Chizhova      Leading Researcher of the Department of Physical Geography and Landscape Science of Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, PhD in Geography;

Andrey N. Shikhov      Professor of the Department of Cartography and Geoinformatics, Perm State University, Doctor of Sciences in Geography;

Lyudmila S. Shumilovskikh      Scientific Researcher of the Department of Palynology and Climate Dynamics, Georg-August-University of Göttingen, PhD in Biology.

**Founder:** Perm State University

**Founder address:** 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia

**Editorial office address:** 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia,  
Faculty of Geography, Department of Biogeocenology and Nature Protection

© Perm State University, 2024



## СОДЕРЖАНИЕ

## РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

|  |    |
|--|----|
| <b>Кадетов Н.Г., Шамонова М.А.</b> Трансформация компонентов биогеоценозов видами рода рейнутрия ( <i>Reynoutria</i> Houtt.) на примере Московской агломерации ..... | 6  |
| <b>Семенов В.В.</b> Проблема практического использования результатов полевых научных наблюдений на заповедных территориях .....                                      | 18 |

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

|   |    |
|---|----|
| <b>Артамонова В.С., Бортникова С.Б.</b> О жизнеспособности складированных отходов переработки сульфидных руд на ранних стадиях почвообразования .....                       | 24 |
| <b>Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.Л.</b> Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах ..... | 37 |
| <b>Егорова Д.О., Ташкинов Е.В.</b> Биоремедиация <i>in situ</i> нефтезагрязненных почв на территории Полазненского месторождения .....                                      | 51 |
| <b>Рачёва Н.Л., Беленко М.С.</b> Анализ отчетности по озоноразрушающим веществам в регионах РФ за 2018-2024 гг. ....  | 64 |

## CONTENTS

## SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

- Kadetov N., Shamonova M.** Transformation of biogeocenoses components by species of *Reynoutria* Houtt. on the example of Moscow agglomeration..... 6
- Semenov V.** Regular on-site observations in strict nature reserves: the problem of data practical usage ..... 18

## SECTION 2. POLLUTION

- Artamonova V., Bortnikova S.** On the viability of stored waste from processing sulfide ores during the early stages of soil formation..... 24
- Gar’kusha D., Fedorov Y., Kosolapov A., Usova E., Anpilova E.** The factors of methane concentrations and emission fluxes formation analysis in water reservoirs ..... 37
- Egorova D., Tashkinov E.** Bioremediation in situ of oil-contaminated soils in the Polaznenskoe oil field area..... 51
- Racheva N., Belenko M.** Analysis of ozone-depleting substances reporting in Russian regions for 2018-2024..... 64



Эффективный менеджмент работает в глобальном масштабе и волнами накатывает на университеты. Вузы теряют самостоятельность, администрация назначается, вместо академических форм взаимодействия вводятся бизнес-процессы, скиллсы, стейки и холдеры, что приводит к размыванию научно-образовательного процесса. Одновременно вводятся индивидуальные образовательные траектории и повышение производительности труда преподавателей, что само по себе свидетельствует, что без искусственного интеллекта здесь не обошлось.

В результате успешного внедрения эффективного менеджмента за океаном отсутствие продовольственной безопасности в кампусах вузов широко распространено. При этом более 40% студентов бакалавриата США не в состоянии обеспечить себя приемлемым питанием, в 750 кампусах по всей стране созданы продовольственные кладовые, а в десяти кампусах Калифорнийского университета было обнаружено, что 25%

аспирантов и 48% магистрантов недоедали. Наконец, нахватка питания отмечена и для 20% аспирантов Великобритании.

Внедрение англо-американской системы бакалавриат-магистратура в России признается неуспешным и термин «бакалавриат» отменяется. Сможет ли РФ вернуться к специальности или не сможет? Научно-педагогическая общественность требует введения формулы 5+2 для обучения на естественно-научных направлениях. Она будет наилучшей для обучения молодежи и обеспечения кадрами капиталистического хозяйства.

В настоящем номере прекрасная оригинальная статья Н.Г. Кадетова и М.А. Шамоновой о проблемах, обусловленных инвазией рейнутрии в экосистемы Московской агломерации. В кратком сообщении В.В. Семенов присоединяется к дискуссии об использовании результатов научных наблюдений на заповедных территориях в капиталистическом хозяйстве. Автор не теряет оптимизма.

В разделе об антропогенных изменениях В.С. Артамонова, С.Б. Бортникова приводят оригинальное исследование многолетних хвостохранилищ и насыпных отходов обогащения золотосодержащих руд с выходом на их рекультивацию и ремедиацию.

Коллектив авторов под руководством Ю.А. Федорова обобщил современные сведения по влиянию различных природных и антропогенных факторов и процессов на образование, концентрацию и окисление метана в воде и донных отложениях.

Завершают номер работы двух тандемов, состоящих из опытного и начинающего исследователя. Так, Д.О. Егорова и Е.В. Ташкинов провели успешные опыты по ремедиации нефтезагрязненных почв. Подробный анализ отчетной документации по озоноразрушающим веществам от предприятий России был подготовлен Н.Л. Рачёвой и М.С. Беленко.

Сочетание опытных и молодых авторов делает изучение всего номера журнала и занимательным, и познавательным.

Главный редактор, С.А. Бузмаков

## РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 581.527.7 (470-25)

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-6-17>

**Трансформация компонентов биогеоценозов видами рода рейнуртрия (*Reynoutria* Houtt.) на примере Московской агломерации**

Никита Геннадьевич Кадетов<sup>1</sup>, Мария Артёмовна Шамонова<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>1,2</sup> [biogeonk@mail.ru](mailto:biogeonk@mail.ru)

**Аннотация.** На основе анализа оригинальных полевых материалов исследованы непосредственные механизмы трансформации компонентов биогеоценозов одними из наиболее агрессивных инвазионных видов – представителями рода рейнуртрия (*Reynoutria* Houtt.). Исследование проводилось в границах Московской агломерации, где проблема биологических инвазий стоит весьма остро. Особое беспокойство вызывают именно виды рода рейнуртрия, более распространённые в урбанизированном ландшафте, нежели в сельской местности, и при этом способные повреждать фундаменты построек и коммуникации. Показано, что при длительном сохранении популяций рейнуртрии возможна полная деградация изначальных фитоценозов с разрушением их состава и структуры. Большое количество корней позволяет рейнуртрии задерживать более мелкие частицы почвы и тем самым изменять физические свойства почв. Минерализация почв в местах произрастания рейнуртрии падает в 1,3-2 раза по сравнению с контрольными точками; поверхностные горизонты почв беднеют и подвержены осолонцеванию. Отмечена тенденция к закислению почв рейнуртрией. Столь значительная трансформация поверхностных горизонтов почв указывает на неэффективность механических методов борьбы с рейнуртрией, а также сложность рекультивации земель после удаления вида. Существенное значение приобретает организация мероприятий, направленных на ограничение распространения растений рода на территории Средней полосы Европейской России.

**Ключевые слова:** инвазионные виды, рейнуртрия, трансформация, почва, фитоценоз, Московская агломерация

**Благодарности:** за помощь в проведении полевых исследований авторы выражают благодарность сотруднику факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова Н.М. Петржик; неоценимую помощь в обработке почвенных проб оказали А.В. Дзубан (химический факультет МГУ), О.В. Шопина и И.Н. Семенов (географический факультет МГУ), О.В. Шальнова, Г.М. Жомин.

**Для цитирования:** Кадетов Н.Г., Шамонова М.А. Трансформация компонентов биогеоценозов видами рода рейнуртрия (*Reynoutria* Houtt.) на примере Московской агломерации // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. №1. С. 6-17. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-6-17>

## SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Original paper

**Transformation of biogeocenoses components by species of *Reynoutria* Houtt. on the example of Moscow agglomeration**

Nikita G. Kadetov<sup>1</sup>, Maria A. Shamonova<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>1,2</sup> [biogeonk@mail.ru](mailto:biogeonk@mail.ru)

**Annotation.** Based on the analysis of original field materials, the direct mechanisms of biogeocenosis components transformation by one of the most aggressive invasive species - representatives of the genus *Reynoutria* Houtt. - have been studied. The study was conducted within the boundaries of the Moscow agglomeration, where the problem of biological invasions is very acute. Of particular concern are species of the genus *Reynoutria*, which are more common in urban landscapes than in rural areas, and at the same time can damage the foundations of buildings and communications. It has been shown that with long-term preservation of *Reynoutria* populations, complete degradation of the original phytocenoses with the destruction of their composition and structure is possible. A large number of roots allows *Reynoutria* to retain smaller soil particles and thereby change the physical properties of soils. Soil mineralization in places where *Reynoutria* grows drops by 1,3-2 times compared to control points; surface soil horizons become poorer and are susceptible to salinity. A tendency towards acidification of soils by *Reynoutria* has been noted. Such a significant transformation of the surface soil horizons indicates the ineffectiveness of mechanical methods of combating *Reynoutria*, as well as the

complexity of land reclamation after removal of the species. The organization of measures aimed at limiting the spread of plants of the genus in the territory of central European Russia is becoming essential.

**Keywords:** invasive species, *Reynoutria*, transformation, soil, phytocenosis, Moscow agglomeration

**Acknowledgments:** for assistance in conducting field research, the authors express gratitude to the employee of the Faculty of Soil Science of Moscow State University named after M.V. Lomonosova N.M. Pietrzyk; A.V. provided invaluable assistance in processing soil samples. Dzuban (Faculty of Chemistry, Moscow State University), O.V. Shopin and I.N. Semenov (Department of Geography, Moscow State University), O.V. Shalnova, G.M. Zhomin.

**For citation:** Kadetov, N., Shamonova, M., 2024. Transformation of biogeocenoses components by species of *Reynoutria* Houtt. on the example of Moscow agglomeration. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(1). pp. 6-17. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-6-17> (in Russian)

## Введение

В наше время существует достаточно много инвазионных видов растений, способных к агрессивному захвату местообитаний и внедрению в природные экосистемы, что создаёт угрозу сохранению биологического разнообразия и нередко приводит к существенным экономическим потерям. Инвазионные растения оказывают различные по силе и характеру воздействия на окружающую среду и её компоненты, однако в большей степени последствия их расселения оказываются негативными. Проблема биологических инвазий признана одной из наиболее существенных угроз развитию человечества. [3, 18]. В связи с сказанным выше важное значение имеет наблюдение и контроль за популяциями инвазионных видов. Данная проблема особо остро стоит в условиях урбанизированных территорий, где экосистемы более уязвимы [27].

В Средней полосе Европейской России и на сопредельных территориях среди наиболее широко распространившихся за последние десятилетия и при этом наиболее агрессивных видов выделяются растения рода рейннурия (*Reynoutria* sp.) семейства гречишных [3, 4, 12, 13, 17, 19, 22, 24 и др.]. Обладая значительной скоростью роста, они причиняют существенный экологический и экономический урон, являясь к тому же достаточно трудноискоренимыми. До сих пор ни в одном регионе Средней полосы Европейской России не осуществляется контроль за состоянием популяции рейннурии. Более того, до конца неясно каким образом рейннурия распространяется, а также каковы конкретные механизмы и параметры трансформации этими растениями экосистем, что затрудняет разработку методов борьбы с ними.

В Средней полосе Европейской России наиболее широко представлены рейннурия богемская (*Reynoutria* x *bohemica* Chrtek et Chrtkova) и японская (*R. japonica* Houtt.). Изредка, в основном в культуре встречается рейннурия сахалинская (*R. sachalinensis* (Fr. Schmidt ex Maxim.) Nakai). Естественный ареал рода охватывает юг Приморья, юг Сахалина, Южные Курилы, Китай, Японию, Корею и Тайвань. В Китае и Японии рейннурия встречается на склонах гор, выступает пионерным видом вулканических пустынь. В 1825 г. Лондонским сельскохозяйственным обществом рейннурия японская была интродуцирована из Китая в Европу. В середине XIX в. растение стало сравнительно популярной в Западной Европе экзотической декоративной культурой. В 1880-х годах в США было отмечено, что рейннурия расселяется вдоль автострад и водотоков. В настоящее время растения рода рейннурия широко распространены в Европе. Во вторичном ареале рейннурия является в основном рудеральным

растением, произрастая около железных дорог, шоссе, на пустырях [3, 22]. Вместе с тем, отмечено распространение рейннурии в долинах рек и на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) [7, 8].

В Средней полосе Европейской России дичание отмечено в 1970-е годы. Поначалу имелись указания на встречи только с рейннурией японской, а имеющая гибридное происхождение рейннурия богемская впервые указана только в 2002 г. Вместе с тем, в последствие сборы растений 1970-х годов и многие другие были переопределены именно как рейннурия богемская. Отмечено, что в Москве и Подмоскowie этот вид встречается значительно чаще, чем родительские виды, в частности рейннурия японская [12, 13, 25]. В связи со сложностью определения и близостью биологии и экологии [19] в настоящей работе оба вида рассматриваются вместе. Отметим, однако, что в абсолютном большинстве изученных популяций, в том числе на участках, где проводились комплексные исследования, согласно приводимым определительным признакам [14] растения принадлежали к гибридной рейннурии богемской.

Расселению рейннурии, в том числе в Московском регионе и сопредельных с ним территориях, способствует в первую очередь внедрение её в культуру как декоративных растений. Вероятно, наиболее активное расселение вида в Москве и окрестностях началось в конце 1980-х – 1990-е годы с расширением популярности дачных посёлков.

Во вторичном ареале рейннурия размножается в основном, а в Московском регионе в настоящий момент, видимо, исключительно вегетативно, что, помимо прочего, связано с поздним цветением и невозможностью вызревания плодов из-за низких температур. Вместе с тем, способность рейннурии к вегетативному возобновлению огромна: отрезок корневища весом 5 г способен к регенерации, оно способно прорасти с глубины 1 м и разрушить пятисантиметровый слой асфальта [30].

Расселение, видимо, происходит фрагментами корневищ и стеблей с переносимой почвой, вдоль водотоков с ливневыми водами [2, 4, 12]. Вид, как правило, образует обширные заросли (рис. 1 / fig. 1). Растения рода рейннурия вошли в список ста наиболее агрессивных инвазионных видов мира, Европы и России [22, 28, 29]. Вид оказывает мощное воздействие на фитоценозы. Отмечено, что аборигенные виды в её зарослях практически отсутствуют, а разнообразие беспозвоночных значительно меньше, чем в зарослях другой рудеральной растительности [4, 28]. Поселяясь в поймах рек, рейннурия вытесняет местные дерновинные виды, тем самым лишая почву защиты от смыва

при половодьях. Корневища, как уже отмечалось, могут разрушать асфальт; в Москве отмечены случаи разрушения фундаментов построек и гидротехнических сооружений [2; личные наблюдения]. Отмечена крайне высокая стоимость рекультивации земель при борьбе с рейнутрией [4].

Вместе с тем, отмечено, что рейнутрия накапливает в себе ценные биологические вещества фенольной

природы. Предполагается, что экстракт рейнутрии может найти применение в качестве стимулятора роста семян [5] и лекарственного средства или биологически-активной добавки [6]. Отмечались стимулирующее воздействие низких концентраций водного экстракта рейнутрии на развитие отдельных культур при ингибирующем воздействии высоких (более 1%) [21].

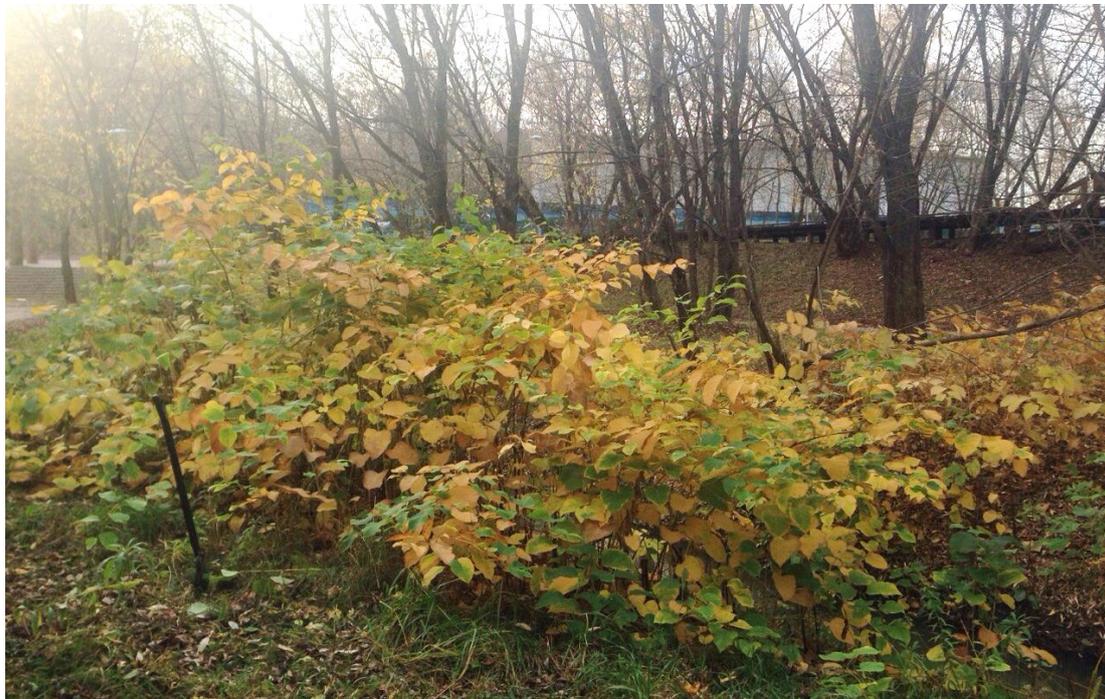


Рис. 1. Заросли рейнутрии в долине р. Чермянки  
Fig. 1. Thickets of Reynoutria in the valley of Chermlyanka river

Эффективных методов борьбы с рейнутрией практически нет. Механическое скашивание лишь немного сдерживает рост популяции. Обработка раундапом более эффективна, однако не подходит для пойм рек и ООПТ. Из биологических мер борьбы возможно использование жуков *Gallerucida nigromacidata* Baly и ржавчинного гриба *Puccinia polygoni-weyrichii* Miyabe [4, 11, 24, 28].

В числе связанных с инвазией рейнутрии экологических рисков – деградация экосистем (в том числе за счёт снижения биологического разнообразия), снижение почвенного плодородия, развитие опасных геолого-геоморфологических процессов.

В связи с изложенным выше целью настоящей работы было выявление возможных путей влияния рейнутрии на фитоценозы и почвы мест её массового произрастания.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Обследование территорий с известными популяциями рейнутрии, выбор характерных участков для комплексного обследования и проведение их геоботанических и почвенных описаний, включая отбор почвенных проб;
- Анализ характера влияния рейнутрии на состав и структуру фитоценозов;

- Анализ проб верхних горизонтов почв по комплексу геохимических и физических параметров (кислотность и щелочность почв, содержание обменных катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , гранулометрический состав, pH, электропроводность, минерализация, влажность и др.);
- Выработка возможных подходов борьбы с рейнутрией на изученных участках.

#### Материалы и методы

На начальном этапе исследования были проанализированы имеющиеся сведения о распространении и приуроченности зарослей рейнутрии в Москве для выбора наиболее характерных участков для подробных исследований. Использованы литературные источники [2, 8, 12, 13, 26] и результаты авторских обследований в различных районах Москвы (природно-исторические парки «Москворецкий» и «Сокольники», природный заказник «Воробьёвы горы» и др.). Отмечено, что подавляющее большинство зарослей приурочены к долинам рек (склоны или поймы). В связи с этим в доступной для регулярных наблюдений долине р. Чермянки на северо-востоке Москвы были выбраны 3 участка (рис. 2 / fig. 2). Для сравнения был также выбран участок в долине р. Лихоборки, расположенной в той же ландшафтной провинции, что и р. Чермянка [1]. На каждом участке обследовались две точки: занятая зарослями рейнутрии и контрольная, расположенная рядом в сходных условиях с таким же рельефом и близким растительным покровом.

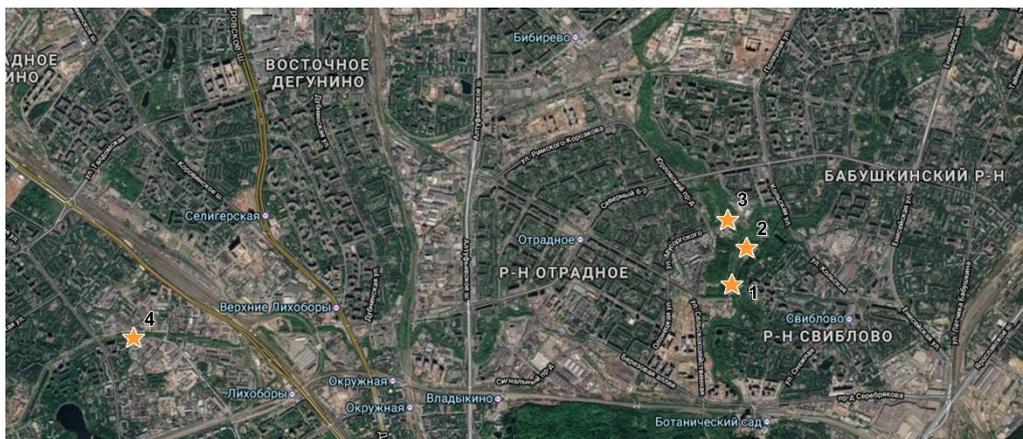


Рис. 2. Расположение участков обследования: 1-3 – долина р. Чермянки, 4 – долина р. Лихоборки  
Fig. 2. Location of survey sites: 1-3 – Chermyanka river valley, 4 – Likhoborka river valley

Влияние растений рода рейннутрия изучали на:

- состояние фитоценозов: были проведены геоботанические описания по стандартной методике [15, 16] на указанных участках и популяциях рейннутрии на других территориях;

- верхние горизонты почв и их геохимические свойства, измеряя следующие показатели [9, 10]:

1. влажность (гигроскопическую воду) – высушиванием в предварительно доведённых до постоянной массы фарфоровых тиглях при температуре 105 °С в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ в течение 72 часов и измерением потери массы;

2. гранулометрический состав лазерным дифрактометром Fritsch Analysette 22 MicroTec Plus

3. общее содержание водорастворимых веществ (tds – total dissolved solids) – по проводимости водной вытяжки 1:5 (датчик электропроводности, цифровая лаборатория LabQuest) и по массе сухого остатка после её прокаливании до 105 °С в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ в течение 72 часов;

4. катионно-анионный состав – методом атомно-абсорбционной спектроскопии для водной вытяжки 1:5 (выполнено в Эколого-геохимическом центре географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова);

5. содержание обменных катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  – комплексометрическое титрование раствора обменных катионов, полученного методом Гедройца (вытеснение аммонийным ионом 1,0 М раствора  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ), 0,1 Н раствором трилона Б в щелочной среде (хлоридно-аммиачный буфер, рН 10) по мурексиду ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и эриохрому чёрному Т ( $\text{Mg}^{2+}$ );

6. кислотность актуальную – по рН водной вытяжки 1:5 (стеклянный электрод, цифровая лаборатория LabQuest) и её титрованию 0,1 Н раствором  $\text{NaOH}$  в присутствии фенолфталеина, и обменную – по методу Дайкухара (титрование 1,0М  $\text{KCl}$  вытяжки 0,1 Н раствором  $\text{NaOH}$  в присутствии фенолфталеина);

7. щёлочность частную (от растворимых карбонатов) и общую (от гидрокарбонатов) – титрованием водной вытяжки 1:5 0,02 Н раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в присутствии фенолфталеина и метилового оранжевого;

8. углерод органических соединений (ОУ) – методом Тюрина, то есть окислением навески почвы (0,05-0,2 г) 0,4 Н раствором  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  в серной кислоте

(1:1) при температуре 150 °С (в сушильном шкафу ШС-80-01 СПУ) в течение 20 мин и последующим титрованием 0,2 Н раствором соли Мора в присутствии фенилантраниловой кислоты для определения количества непрореагировавшего окислителя.

Для двух участков также были исследованы нижележащие горизонты почв по тем же группам параметров.

Перед проведением аналитических исследований пробы почв высушивали до воздушно-сухого состояния в тени. Значения всех показателей приведены на воздушно-сухую почву.

Рабочие растворы готовили растворением точно известного количества вещества в воде в мерных колбах на 100, 250, 500 и 1000 мл. Для титрованных растворов использовали фиксаналы либо проводили стандартизацию ( $\text{NaOH}$  – по 0,1 Н  $\text{HCl}$ , соль Мора – по 0,1 Н  $\text{KMnO}_4$ ).

Все навески брали на аналитических весах ВЛ-224 (ГОСМЕТР) с точностью до 0,1 мг.

На участках 1 и 2 производились измерения высоты снежного покрова в период с ноября 2018 г. по март 2019 г. (замер производился в точках контроля и точках с рейннутрией). Привлечены данные по состоянию снежного покрова в местах произрастания рейннутрии в других районах Москвы.

### Результаты и обсуждение

**Влияние рейннутрии на состав и структуру фитоценозов.** Геоботанические описания проводились на всех 4 участках (3 в долине Чермянки и 1 в долине Лихоборки) для двух точек: одной с популяцией рейннутрии и парной ей точке контроля. Отметим, что, судя по меньшей высоте растений, их плотности и проективному покрытию, популяции рейннутрии на втором и третьем участках/парах точек несколько более молодые, чем на первом и четвёртом.

На всех 4 участках заметно снижение числа видов, слагающих фитоценоз в точке произрастания рейннутрии, по сравнению с точкой контроля. На приуроченном к склону останца террасы в долине Чермянки первом участке эта разница наиболее заметна: в сложении описанной в контроле ясенево-кленовой разнотравно-сорнотравной ассоциации принимает участие 21 вид, из которых 18 – виды травяно-кустарничкового яруса, в сложении соседствующей кленовой рейннутриевой ассоциации – 10 и 6 видов соответственно. На участке

2 (пойма Чермянки) травяно-кустарничковый ярус представлен в точке контроля 6 видами, а в точке произрастания рейнутрии – 4. На участках 3 (пойма Чермянки) и 4 (долина Лихобрки) также отмечается резкое снижение числа видов растений в фитоценозах с участием рейнутрии: в точках контроля наблюдается 26 и 43 вида, в точках с рейнутрией 10 и 11 видов соответственно.

На расположенных выше по течению Чермянки участках и других обследованных территориях – природный заказник «Воробьёвы горы», природно-исторический парк «Сокольники», памятник природы «Карамышевский берег р. Москвы», участки долины Яузы в среднем течении – отмечены сообщества, в которых травяно-кустарничковый ярус образован или исключительно рейнутрией или ещё двумя-тремя видами,

кроме неё. Таким образом, обеднение флористического состава сообществ в результате внедрения рейнутрии очевидно.

Существенным образом влияет рейнутрия и на структуру сообществ. В первую очередь это влияние сказывается на травяно-кустарничковом ярусе: постепенно увеличивая своё обилие, и рейнутрия в итоге достигает практически стопроцентного проективного покрытия (ПП). Так, на первом участке ПП травяно-кустарничкового яруса в контроле – 70%, на точке с рейнутрией – 100%; на втором в контроле – 70%, в точке с рейнутрией – 90% (рис. 3-4 / fig. 3-4). На участках 3 и 4 ПП травяно-кустарничкового яруса в контроле 90%, в точке с рейнутрией – 100%. Подобная ситуация наблюдалась и на других обследованных территориях. Вытесняя прочие виды, рейнутрия в конечном счёте приводит к упрощению яруса – исчезновению его членения на подъярусы, фитоценотические горизонты.

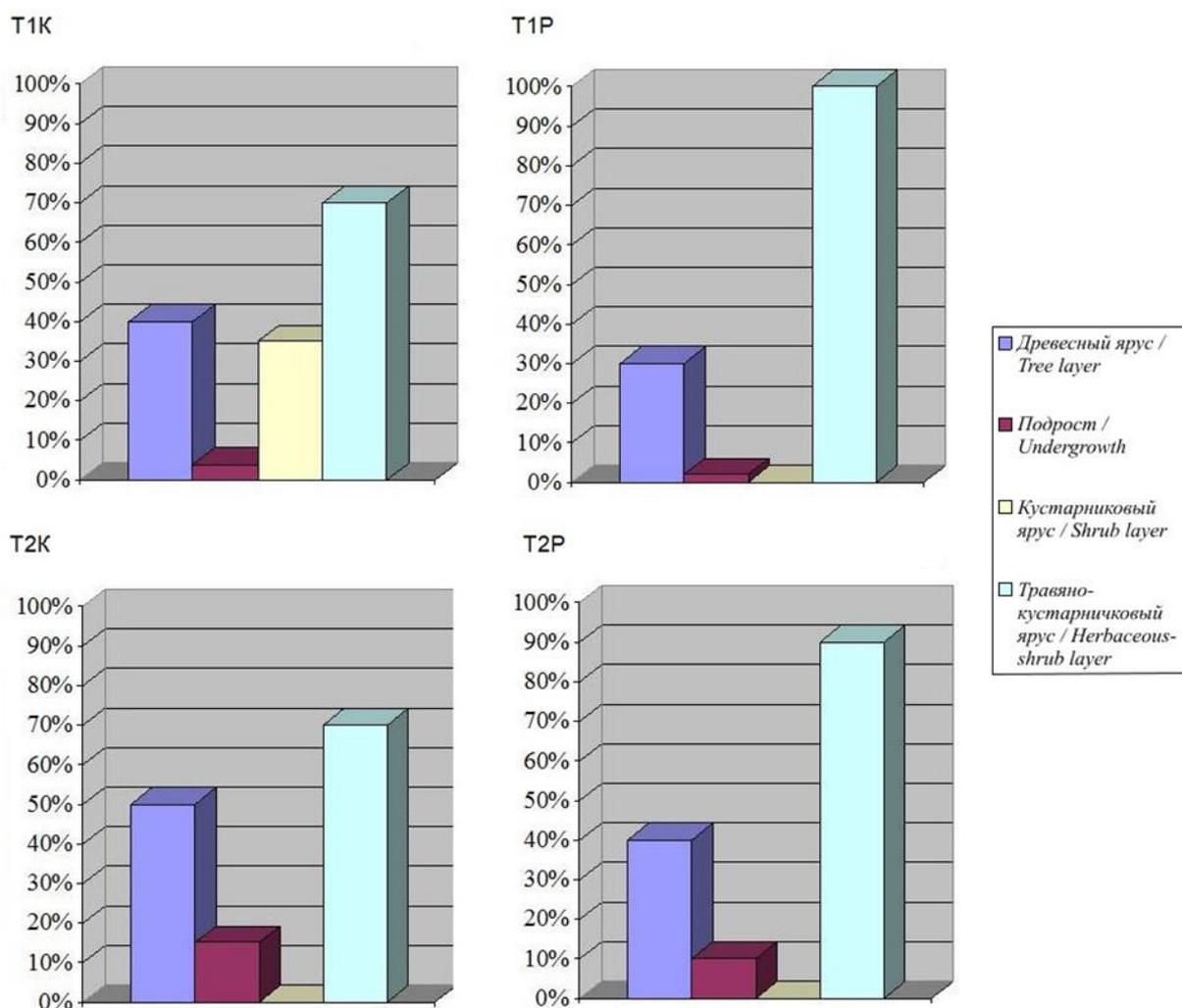


Рис. 3. Проективное покрытие структурных компонентов сообществ

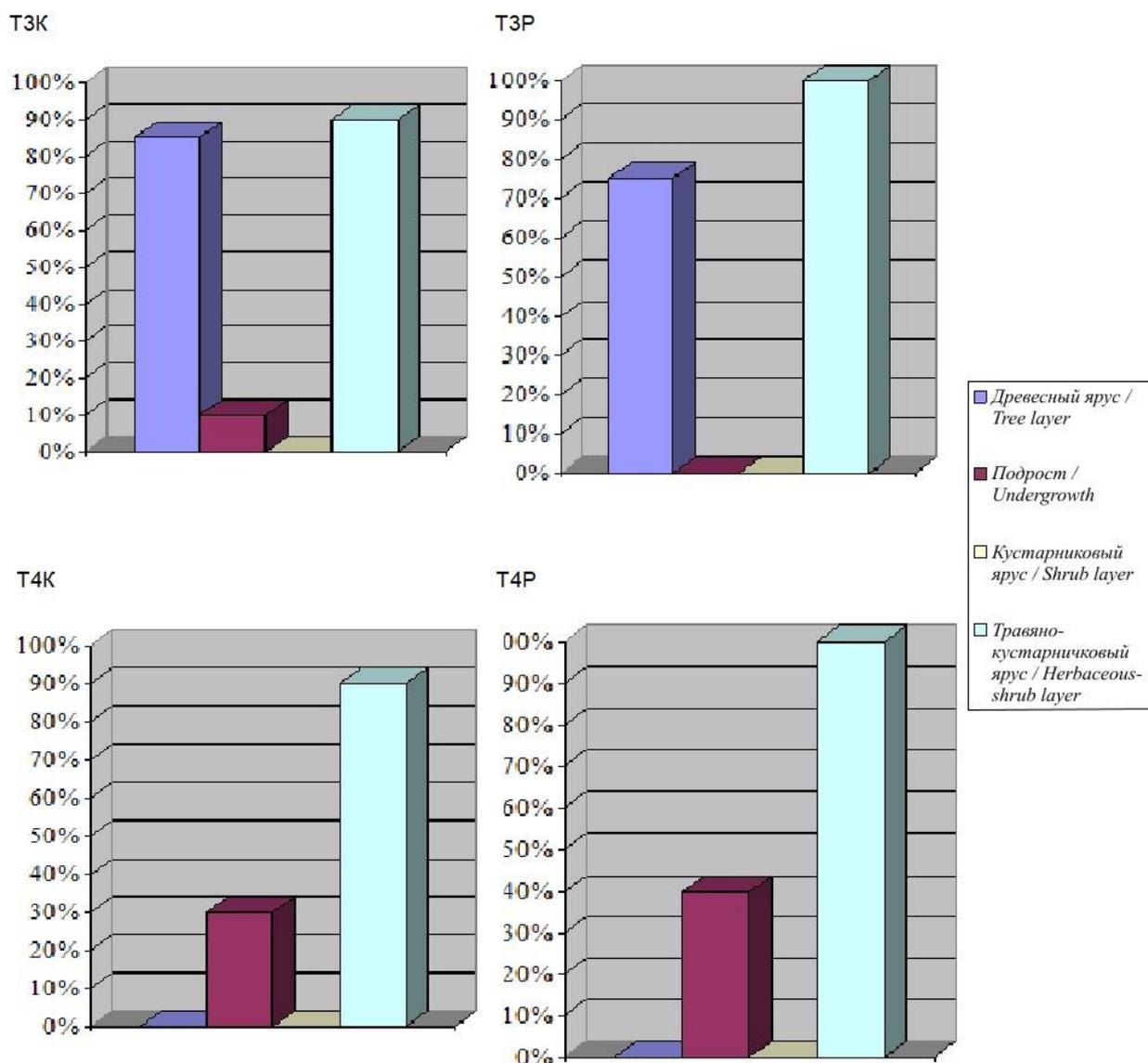
\* **Примечание:** T1, T2 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнутрией.

Fig. 3. Projective coverage of structural components of communities

\* **Note:** T1, T2 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species.

Появление рейнутрии фактически приводит к исчезновению подростка. Так, кустарниковый ярус в контроле первого участка имеет ПП 35%, а в точке с рейнутрией отсутствует вовсе. За счёт мощного разрастания и последующего затенения рейнутрия приводит к

исчезновению подростка. На всех участках ПП подростка в точках с рейнутрией в 1,5-2 раза меньше, чем в точках контроля. Количество видов и их распространенность уменьшается при переходе от точек контроля к точкам с рейнутрией.



**Рис. 4. Проективное покрытие структурных компонентов сообществ**

\* **Примечание:** T1, T2 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнутрией.

**Fig. 4. Projective coverage of structural components of communities**

\* **Note:** T1, T2 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species.

Таким образом, при долговременном сохранении зарослей рейнутрии и отмирании со временем существующего древостоя можно ожидать практически полной деградации изначальных фитоценозов с разрушением как их состава, так и структуры.

Судя по наблюдающемуся ходу изменения фитоценозов, воздействие рейнутрии на прочие виды происходит как за счёт затенения, так и за счёт физического занятия пространства при большей способности к вегетативному росту.

В подобных ситуациях логичным методом борьбы с видом кажется скашивание его зарослей. В ходе обследований нами отмечались участки, на которых проводилось скашивание зарослей рейнутрии. Теоретически, подобная мера должна сдерживать рост популя-

ции, однако, согласно имеющимся литературным данным [4, 24] и нашим наблюдениям, этого не происходит.

Выяснению причин неэффективности данного метода может, в частности, поспособствовать анализ влияния рейнутрии на свойства почв, предпринятый нами в дальнейшем. Вместе с тем, скашивание рейнутрии может опосредованно оказывать положительное влияние, в частности через нивелирование разницы в накоплении и таянии снега, для чего нами были начаты наблюдения за уровнем снежного покрова, показавшие, что высота снега в точках контроля в среднем на 1 см больше высоты снега в точках произрастания рейнутрии. Данное распределение можно объяснить тем, что рейнутрия, за счёт длительно (часто всю зиму) сохраняющихся листьев и стеблей задерживает часть снежного покрова. Потенциально подобный процесс

перераспределения снега может оказывать влияния как на свойства самого участка с рейнтурией, так и сопредельных территорий. Сопоставление наблюдений на исследуемых участках, где скашивание рейнтурии не проводилось, с данными по участкам со скошенными популяциями рейнтурии не выявили чётких тенденций.

#### Влияние рейнтурии на верхние горизонты почв.

Согласно полевым описаниям почв на точках с рейнтурией относительного контроля повышается плотность поверхностных горизонтов. В качестве вероятной причины можно рассматривать увеличение плотности корней.

Данное наблюдение коррелирует с лабораторным определением гранулометрического состава: на участках 1, 2 и 3 процентное содержание пылеватых и или-

стых частиц становится больше (рис. 5 / fig. 5). Исключение составляет участок 4, где данное соотношение в слабой мере отмечается только для горизонта А2, что связано с насыпным характером горизонта А1. Подобное распределение можно связать с тем, что рейнтурия за счёт значительного числа корней удерживает мелкие частицы, тем самым трансформируя местообитание. Вместе с тем, нельзя исключать, хотя и с крайне низкой вероятностью, что точки с рейнтурией могли быть изначально расположены в относительных понижениях рельефа, по сравнению с контрольными участками, либо сама рейнтурия предпочитает изначально селиться в микропонижениях, которые затем нивелируются. В таком случае наблюдаемые отличия в соотношении частиц и наличие рейнтурии являются параллельными процессами, а не взаимообусловленными.

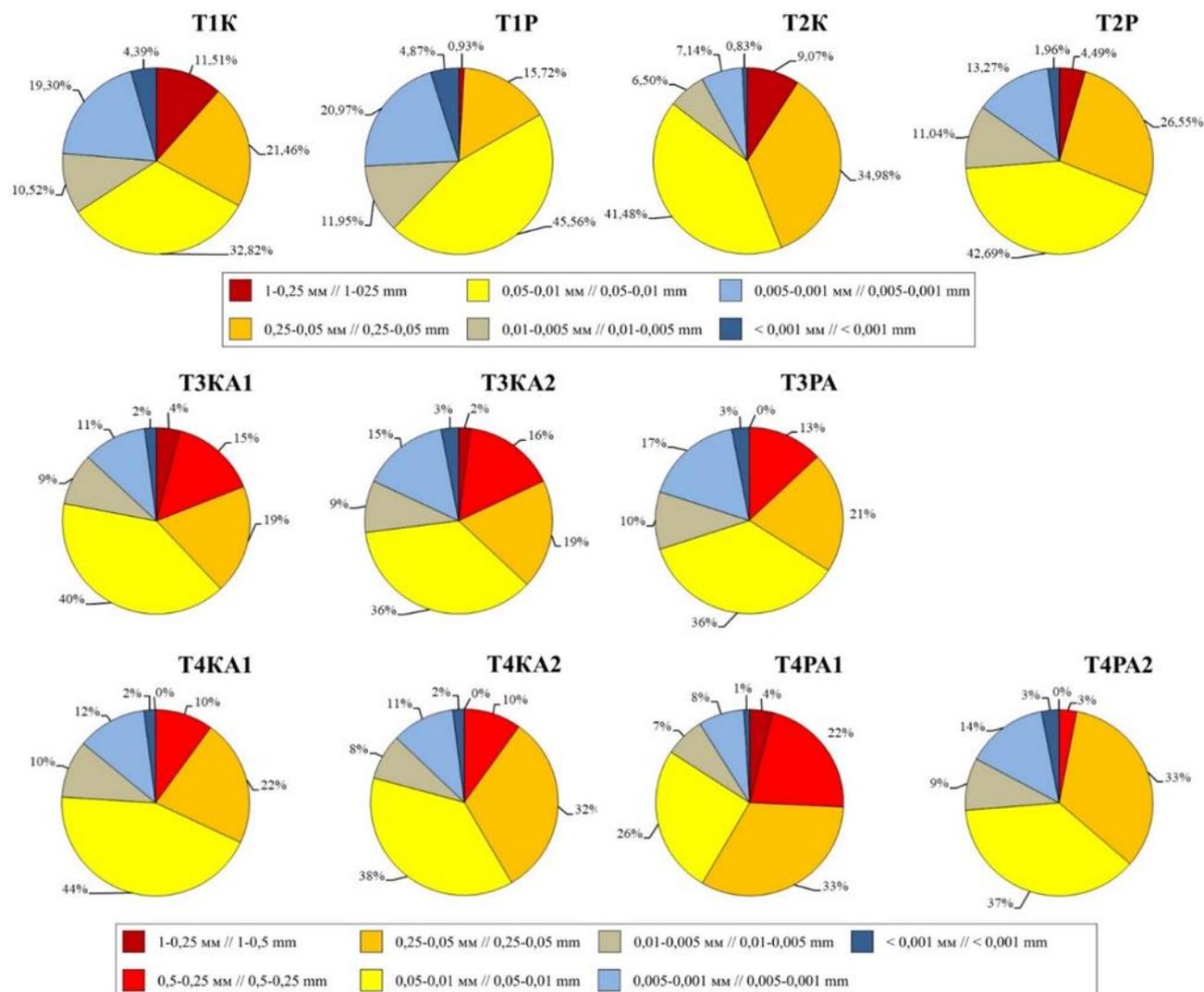


Рис. 5 Гранулометрический состав почв исследованных участков\*

\* **Примечание:** T1, T2, T3, T4 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнтурией; A1 – гумусовый горизонт, A2 – элювиальный горизонт.

Fig. 5. Granulometric composition of soils in the studied areas

\***Note:** T1, T2, T3, T4 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species; A1 – humus horizon, A2 – eluvial horizon.

Величина pH в изученных пробах составляет 7,5; 7,4; 7,6 и 7,6 для контроля и 6,6; 7,1; 7,5 и 6,6 для точек с рейнтурией соответственно, что в целом выше, чем свойственная природным почвам Подмосквья кислая

и слабокислая реакция (5,5-6,5) (таб. 1 / tabl. 1). Однако в городской среде из-за строительства, применения реагентов, промышленной пыли и других причин pH ста-

новится в среднем нейтрально-слабощелочным до щелочного. Полученные значения рН таким образом укладываются в приемлемые для города значения [20]. Отметим, что величина рН в каждой паре точек выше в контроле, чем в точках с рейнутрией. Возможной причиной снижения рН поверхностных горизонтов почв в точках произрастания рейнутрии можно считать большее количество биомассы, в том числе и корневой, обменивающих протоны на катионы важных для растения элементов.

Минерализация почв в точках контроля в 1,2-1,3 (местами – в 2) раза больше, чем в точках произрастания рейнутрии. Можно сказать, что на данных участках прослеживается тенденция к "вытягиванию" рейнутрией солей и минеральных соединений из поверхностных горизонтов почв в местах её произрастания, что не может не сказываться на видовом составе соответствующих фитоценозов.

Таблица 1.

## Химические свойства обследованных почв

Table 1.

## Chemical properties of the studied soils

|   | Образцы почв / Soil samples* |      |      |      |        |        |       |        |        |        |        |  |
|---|------------------------------|------|------|------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--|
|   | T1K                          | T1P  | T2K  | T2P  | T3KA1  | T3KA2  | T3PA  | T4KA1  | T4KA2  | T4PA1  | T4PA2  |  |
| Na <sup>+</sup> , мг/л // mg/l  | 4,41                         | 3,86 | 27,5 | 14,8 | 3,63   | 2,84   | 2,96  | 12,9   | 22     | 13,1   | 8,7    |  |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> мг/л // mg/l   | 0,38                         | 0,5  | 0,78 | 0,46 | 1      | 0,5    | <0,1  | <0,1   | <0,1   | <0,1   | <0,1   |  |
| K <sup>+</sup> , мг/л // mg/l   | 19,6                         | 16,5 | 9,53 | 7,47 | 8,8    | 2,8    | 2,65  | 9,92   | 7,63   | 7,6    | 5,68   |  |
| Mg <sup>2+</sup> , мг/л // mg/l   | 1,85                         | 1,82 | 15,4 | 6,44 | 1,76   | 1,33   | 1,3   | 2,45   | 2,77   | 2,2    | 1,09   |  |
| Ca <sup>2+</sup> , мг/л // mg/l   | 38,3                         | 44,3 | 128  | 65,2 | 40,87  | 32,78  | 26,31 | 40,63  | 58,71  | 26,7   | 45,2   |  |
| F, мг/л // mg/l   | 0,58                         | 0,6  | 0,34 | 0,43 | 0,52   | 0,41   | 0,63  | 1,16   | 1,46   | 0,7    | 0,56   |  |
| Cl, мг/л // mg/l  | 5,16                         | 6,21 | 12,1 | 13,8 | 15,67  | 13,5   | 6,89  | 17,71  | 24,93  | 23,05  | 17,58  |  |
| NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/л // mg/l   | 0,49                         | 0,5  | 7,9  | 17,1 | 5,8    | 0,1    | <0,1  | 12,65  | <0,1   | <0,1   | <0,1   |  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л // mg/l   | 34,5                         | 38,2 | 341  | 74,9 | 22,81  | 6,29   | 3,84  | 9,7    | 19,04  | 22,85  | 3,42   |  |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/л // mg/l  | 0,1                          | 0,26 | 1,4  | 1,42 | <0,1   | <0,1   | <0,1  | <0,1   | <0,1   | <0,1   | <0,1   |  |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л // mg/l  | 10,1                         | 11,3 | 56,6 | 25,3 | 8,64   | 4,46   | 4,57  | 14,53  | 120    | 34,5   | 92,2   |  |
| Гигроскопическая вода, % // Hygroscopic moisture, %   | 2,5                          | 3,6  | 11,7 | 8,4  | 3,6    | 1,9    | 1,6   | 3,3    | 2,5    | 3,8    | 3,8    |  |
| Водорастворимые вещества, % // Dissolved solids, %  | 0,22                         | 0,1  | 0,43 | 0,21 | 0,064  | 0,165  | 0,042 | 0,029  | 0,14   | 0,08   | 0,062  |  |
| рН  | 7,5                          | 7,4  | 6,6  | 7,1  | 7,61   | 7,43   | 7,53  | 7,56   | 6,24   | 6,59   | 4,09   |  |
| Минерализация // Soil salinity, мг/л // mg/l  | 0,1                          | 0,08 | 0,15 | 0,11 | 0,134  | 0,14   | 0,107 | 0,196  | 0,35   | 0,208  | 0,27   |  |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , ммоль (-)/100 г // HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mmol (-)/100 g | 0,62                         | 0,35 | 0,44 | 0,65 | 0,168  | 0,131  | 0,144 | 0,169  | 0,125  | 0,01   | 0,037  |  |
| Ca <sup>2+</sup> обм, ммоль (+)/100 г // Ca <sup>2+</sup> , mmol (+)/100 g                        | 0,84                         | 0,8  | 1,61 | 1,18 | 1,125  | 0,9688 | 0,847 | 1,3125 | 0,6875 | 0,5625 | 0,4688 |  |
| Mg <sup>2+</sup> обм, ммоль (+)/100 г // Mg <sup>2+</sup> , mmol (+)/100 g                        | 0,01                         | 0    | 0,2  | 0,15 | 0,4375 | 1,25   | 0,844 | 0,4063 | 0,1818 | 0,375  | 0,751  |  |
| Обменн. катионы, ммоль (+)/100 г // Exchange cations, mmol (+)/100 g                              | 0,33                         | 0,27 | 0,82 | 0,41 | 0,016  | 0,0238 | 0,017 | 0,0317 | 0,0476 | 0,0634 | 0,0477 |  |

\* **Примечание:** T1, T2, T3, T4 – номера участков; K – контроль, P – сообщества с рейнутрией; A1 – гумусовый горизонт, A2 – элювиальный горизонт.

\* **Note:** T1, T2, T3, T4 – plot numbers; K – control, P – communities with reynoutria species; A1 – humus horizon, A2 – eluvial horizon.

На первом участке содержание общего углерода ниже, чем на втором. Стоит отметить, что в точках контроля содержание углерода в 1,2-1,5 раз меньше, чем в точках с рейнутрией, что, вероятно, объясняется достаточно большим количеством опада, образованного рейнутрией, что приводит как к изменению состава ви-

дов по требовательности к условиям почвенного богатства, так и делает невозможным развитие (и даже попадание диаспор) ряда видов вовсе.

По результатам анализа катионно-анионного состава заметим, что почвы на втором участке более солонцеватые (содержание натрия в 1,1 - 1,9 раз больше

под рейннутрией). Подобная ситуация может быть объяснена как тем, что там оседает больше солей из реагентов, так и осолонцеванием (что, в принципе, может рассматриваться как относительно естественный процесс под рейннутрией).

Количество обменных катионов  $Mg^{2+}$  и  $Ca^{2+}$  в почвах из точек с рейннутрией меньше, чем в почвах из точек контроля. Суммарное количество обменных катионов в точках контроля в 1,2-2 раза больше, чем в точках произрастания рейннутрии. Содержание таких ионов, как  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$ , в точках контроля выше, чем в точках произрастания рейннутрии. Содержание же анионов  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ , наоборот, ниже в точках контроля.

В целом, прослеживается тенденция к выщелачиванию поверхностных горизонтов почв рейннутрией. Это обусловлено следующими причинами:

- количество катионов натрия (в 1,1-1,9 раза) и калия (в 1,2-1,3 раза) больше под рейннутрией (на участках 1 и 2 – это справедливо уже для верхних горизонтов; на участках 3 и 4 – для нижних горизонтов, что связано с наличием насыпных грунтов);

- минерализация (%) уменьшается в 4 парах точек в 1,3-1,8 раза;

- уменьшается кол-во обменных катионов кальция (до 1,4 раза) и магния (в 1,3-2,0 раза).

При этом отмечена тенденция к удержанию анионов в поверхностных горизонтах почв: содержание ряда, в частности, на участках 1 и 2 анионов больше под рейннутрией (хлора в 1,1-1,2 раза, нитритов  $NO_2^-$  до 2,2 раза, фосфатов  $PO_4^{3-}$  до 2,6 раза).

Это означает, что под рейннутрией поверхностные горизонты почв, по сравнению с теми же условиями на контрольных точках, постепенно подкисляются, беднеют (выщелачиваются, теряют питательные катионы) и больше подвержены осолонцеванию. При этом отмечена тенденция к снижению pH (таб. 1).

Таким образом, формирование зарослей рейннутрии приводит к комплексному изменению свойств поверхностных горизонтов почв, что доказывает практически полную неэффективность механических методов борьбы с ней и указывает на крайнюю сложность рекультивации территорий после удаления вида.

Поскольку рейннутрия нуждается в достаточно большом количестве ионов кальция и магния, то, вероятно, их нехватка сможет уменьшить ее рост и распространение.

Известно, что в стеблях рейннутрии присутствуют друзы с оксалатом кальция [23], возможно, изменяя содержание кальция в почве, можно добиться ухудшения роста растения. Согласно проведенному нами исследованию в точках контроля содержание обменного катиона  $Ca^{2+}$  заметно выше, чем в точках произрастания рейннутрии.

#### **Заключение**

Анализ фитоценозов в долинах Чермянки и Лихоборки подтвердил снижение числа видов, слагающих фитоценозы в точках произрастания рейннутрии по сравнению с точками контроля. На участках произрастания рейннутрии происходит постепенное упрощение структуры сообществ. Показано, что при длительном сохранении популяции рейннутрии следует ожидать

практически полной деградации изначальных фитоценозов с разрушением их состава и структуры.

За счёт большого количества корней, рейннутрия задерживает более мелкие частицы почвы, тем самым изменяя местообитание. Химический анализ почв показал, что рейннутрия «вытягивает» значительную часть полезных веществ из почвы, что неблагоприятно влияет на видовой состав фитоценозов. Поверхностные горизонты почв под рейннутрией беднеют, подвержены осолонцеванию. Отмечена тенденция к закислению почв рейннутрией.

Образование зарослей рейннутрии влечет за собой существенные изменения свойств поверхностных горизонтов почв, что указывает на неэффективность механических методов борьбы с ней и на серьезные сложности при рекультивации территорий после удаления вида.

Скашивание зарослей рейннутрии не является эффективным способом борьбы с ней. За счет сохранения стеблей и листьев в течение зимнего периода, рейннутрия способна задерживать часть снежного покрова. Данное явление может оказывать серьезное влияние на свойства в том числе и близлежащих местообитаний. При сопоставлении результатов наблюдений за изменением высоты снежного покрова на территориях, где заросли рейннутрии не скашивались, и территориях, где заросли подвергались механическому воздействию, четких тенденций выявить не удалось.

В силу вышеизложенного существенное значение приобретает организация мероприятий, направленных на ограничение распространения растений рода рейннутрия на территории Средней полосы Европейской России. Учитывая опасность распространения рейннутрии и малую эффективность мер борьбы с ней, необходимо как можно более раннее тщательное наблюдение за расселением рейннутрии на территории Москвы. Это предоставит возможность на ранних стадиях организовать мероприятия, направленные на ограничение распространения данного растения.

Выявленные тенденции и сделанные выводы в полной мере применимы только к обследованным долинам Чермянки и Лихоборки и лишь с оговорками – к территории Средней полосы Европейской России.

#### **Сведения об авторском вкладе**

Н.Г. Кадетов – разработка проблематики и концепции исследования, участие в полевых работах, участие в анализе результатов, вычитка финального варианта статьи

М.А. Шамонова – сбор сведений об особенностях вида и способах борьбы с ним, участие в полевых работах, проведение химических анализов, первичный анализ результатов, подготовка первичного текста статьи.

#### **Contribution of the authors**

N.G. Kadetov – development of the research problems and concept, participation in field work, participation in the analysis of results, proofreading of the final version of the article.

M.A. Shamonova – collecting information about the characteristics of the species and methods of combating it, participating in field work, conducting chemical analyzes,

primary analysis of the results, preparing the primary text of the article.

#### Список источников

1. Анненская Г.Н., Жучкова В.К., Калинина В.Р., Мамай И.И., Низовцев В.В., Хрусталева М.А., Цесельчук Ю.Н. Ландшафты Московской области и их современное состояние. Смоленск: Изд-во Смол. гуманитар. ун-та, 1997. 296 с.
2. Васильев О.Д., Михеева А.И., Кадетов Н.Г. Картографирование популяций инвазивных растений на городских ООПТ с использованием ДДЗ // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве. М.: ЦЭПЛ РАН, 2013. С. 261-262.
3. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Чёрная книга флоры Средней России. М.: Геос, 2010. 494 с.
4. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Нотов А.А. Чёрная книга флоры Тверской области. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2011. 279 с.
5. Зорикова С.П., Зорикова О.Г. Изучение рейнутрии японской (*Reynoutria japonica*) на объектах животного и растительного происхождения. // Изв. Самар. НЦ РАН. 2011. т.13, №1-4. С. 831-834.
6. Иванов В.В., Денисенко О.Н. Полифенольные соединения горца (рейнутрии) сахалинского. // Фундаментальные исследования. 2013. № 10-2. С. 374-377.
7. Кадетов Н.Г., Сулова Е.Г. Инвазивные растения на региональных особо охраняемых природных территориях Московской области // Биоразнообразие: подходы к изучению и сохранению. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2017. С. 131-133.
8. Кадетов Н.Г., Чернышов М.П. Влияние инвазивных видов растений на элементы зелёной инфраструктуры городов на примере Московской агломерации // Социально-экологические технологии. 2021. Т. 11, № 3. С. 305-321. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-3-327-344>
9. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2009. 148 с.
10. Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Техника лабораторных работ. М.: Геогр. ф-т МГУ, 2010. 116 с.
11. Куклина А.Г., Каштанова О.А., Ткаченко О.Б., Келдыш М.А., Червякова О.Н. Фитосанитарный мониторинг инвазивных видов гибридогенного комплекса *Reynoutria* Houtt. (Polygonaceae) // Бюллетень Главного ботанического сада. 2020. № 2. С. 63-68.
12. Майоров С.Р., Бочкин В.Д., Насимович Ю.А., Щербаков А.В. Адвентивная флора Москвы и Московской области. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2012. 538 с.
13. Майоров С.Р., Алексеев Ю.Е., Бочкин В.Д., Насимович Ю.А., Щербаков А.В. Чужеродная флора Московского региона: состав, происхождение и пути формирования. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2020. 576 с.
14. Маевский П.Ф. Флора средней полосы европейской части России. М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2014. 635 с.
15. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
16. Методы полевых и лабораторных исследований растений и растительного покрова. Петрозаводск, 2001. 360 с.
17. Мотыль М., Бакей С. Риск тотальной инвазии рейнутрии японской в новом климате Беларуси // Наука и инновации. 2019. №7. С. 71-74. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2019-10-71-74>
18. Неронов В.М., Луцкекина А.А. Чужеродные виды и сохранение биологического разнообразия // Успехи современной биологии, 2001, т. 121, № 1. С. 121-128.
19. Панасенко Н.Н. Роль инвазивных растений в современных процессах преобразования растительного покрова. Дисс. ... д.б.н. Брянск, 2021. 326 с.
20. Почва, город, экология / ред. Г.В. Добровольский. М., 1997. 320 с.
21. Прохоров В.Н. Аллелопатический потенциал адвентивных видов с высокой инвазивной активностью во флоре Беларуси // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биял. наук. 2018. Т. 63, №2. С. 163-170.
22. Самые опасные инвазивные виды России (ТОП-100) / Ред. Дгебуадзе Ю.Ю., Петросян В.Г., Хляп Л.А. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 688 с.
23. Серебряная Ф.К., Иванов В.В., Денисенко О.Н., Бережная Л.А. Морфолого-анатомическое исследование горца (рейнутрии) сахалинской // Современные проблемы науки и образования. 2014. №2. С. 274-279.
24. Решетникова Н.М., Майоров С.Р., Крылов А.В. Чёрная книга Калужской области. Сосудистые растения. Калуга: ООО «Ваш Домь», 2019. 342 с.
25. Флора Москвы / под. ред. В.С. Новикова. М.: Голден-Би, 2007. 512 с.
26. Шамонова М.А., Кадетов Н.Г. Влияние растений рода рейнутрия на компоненты экосистем долин малых рек в условиях города // Актуальные вопросы охраны биоразнообразия на заповедных территориях: мат. Всерос. науч.-практ. Конф. Уфа: РИЦ БашГУ, 2020. С. 379-384.
27. Экология крупного города (на примере Москвы). М.: «ПАСЬВА», 2001. 192 с.
28. Handbook of alien species in Europe/ Invading nature: springer series in invasion ecology. Vol. 3. Springer, 2009. 400 p.
29. Lowe S., Browne M., Boudjelas S., De Poorter. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A selection from the *Global Invasive Species Database* (IUCN). The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN), 2000. 12 p.
30. Shaw R.H., Seiger L.A. Japanese knotweed // Biological control of invasive plants in the Eastern United States. USDA APHIS PPQ and USDA Forest Service, 2002. P. 159-166.

#### References

1. Annenskaya, G., Zhuchkova, V., Kalinina, V. Mamai, I., Nizovtsev, V., Khrustaleva, M. and Tseselchuk, Yu., 1997. *Landshafty Moskovskoy oblasti i ikh sovremennoye sostoyaniye* [Landscapes of the Moscow region and their current state]. Smolensk, Izd-vo Smol. humanit. un-ta, 296 p. (in Russian)

2. Vasil'yev, O., Mikheyeva, A. and Kadetov, N., 2013. Kartografirovaniye populyatsiy invazivnykh rasteniy na gorodskikh OOPT s ispol'zovaniyem DDZ [Mapping populations of invasive plants in urban protected areas using remote sensing]. *Aerokosmicheskiye metody i geoinformatsionnyye tekhnologii v lesovedenii i lesnom khozyaystve*. Moscow: TSEPL RAN, pp. 261-262. (in Russian)
3. Vinogradova, Yu., Mayorov, S. and Khorun, L., 2010. *Chornaya kniga flory Sredney Rossii* [Black Book of the Flora of Central Russia]. Moscow, Geos publ., 494 p. (in Russian)
4. Vinogradova, Yu., Mayorov, S. and Notov, A., 2011. *Chernaya kniga flory Tverskoy oblasti* [Black book of flora of the Tver region]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 279 p. (in Russian)
5. Zorikova, S. and Zorikova, O., 2011. Izucheniye reynutrii yaponskoy (*Reynoutria japonica*) na ob'yektakh zhivotnogo i rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Study of Japanese Reynoutria japonica on objects of animal and plant origin]. // *Izv. Samar. NTS RAN*. 13(1-4), pp. 831-834. (in Russian)
6. Ivanov, V. and Denisenko, O., 2013. Polifenol'nyye soyedineniya gortsa (reynutrii) sakhalinskogo [Polyphenolic compounds of Sakhalin knotweed (reynutria)]. *Fundamental'nyye issledovaniya*. (10-2), pp. 374-377. (in Russian)
7. Kadetov, N. and Suslova, E., 2017. *Invasive plants on the natural protected areas of Moscow region. Biodiversity: approaches to study and conservation*. Tver, Tver. state Univ., pp. 131-133. (in Russian)
8. Kadetov, N. and Chernyshov, M., 2021. Invasive plant species influence on the elements of green infrastructure of cities on the example of the Moscow agglomeration. *Environment and Human: Ecological Studies*, 11(3), pp. 327-344. (in Russian) <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-3-327-344>
9. Krechetov, P. and Dianova, T. *Khimiya pochv* [Soil chemistry]. *Analiticheskiye metody issledovaniya*. Moscow, Geogr. f-t MGU, 148 p. (in Russian)
10. Krechetov, P. and Dianova, T., 2010. *Khimiya pochv. Tekhnika laboratornykh rabot* [Soil chemistry. Laboratory technology]. Moscow, Geogr. f-t MGU, 116 p. (in Russian)
11. Kuklina, A., Kashtanova, O., Tkachenko, O., Keldysh, M. and Chervyakova, O., 2020. Phytosanitary monitoring of invasive species of the reynoutria houtt. (polygonaceae) hybrid complex. *Byulleten' glavnogo botanicheskogo sada*, (2), pp. 63-68. (in Russian)
12. Mayorov, S., Bochkin, V., Nasimovich, Yu. And Shcherbakov, A., 2012. *Adventivnaya flora Moskvy i Moskovskoy oblasti* [Adventive flora of Moscow and the Moscow region]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 538 p. (in Russian)
13. Mayorov, S., Alekseyev, Yu., Bochkin, V., Nasimovich, Yu. and Shcherbakov, A., 2020. *Chuzherodnaya flora Moskovskogo regiona: sostav, proiskhozhdeniye i puti formirovaniya* [Alien flora of the Moscow region: composition, origin and ways of formation]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 576 p. (in Russian)
14. Mayevskiy, P., 2014. *Flora sredney polosy yevropeyskoy chasti Rossii* [Flora of the central zone of the European part of Russia]. Moscow, Tov-vo nauch. izd. KMK, 635 p. (in Russian)
15. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg, NIIKhimii SPbGU, 2002, 240 p. (in Russian)
16. *Metody polevykh i laboratornykh issledovaniy rasteniy i rastitel'nogo pokrova* [Methods of field and laboratory research of plants and vegetation]. Petrozavodsk, 2001. 360 p. (in Russian)
17. Motyl', M., Bakey, S., 2019. Risk total'noy invazii reynutrii yaponskoy v novom klimate Belarusi [The risk of total invasion of Rhinenutria japonica in the new climate of Belarus]. *Nauka i innovatsii*. (7), pp. 71-74. (in Russian) <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2019-10-71-74>
18. Neronov, V. and Lushchekina, A., 2001. Chuzherodnyye vidy i sokhraneniye biologicheskogo raznoobraziya [Alien species and conservation of biological diversity]. *Uspekhi sovremennoy biologii*. 121(1), pp. 121-128. (in Russian)
19. Panasenko, N., 2021. *Rol' invazionnykh rasteniy v sovremennykh protsessakh preobrazovaniya rastitel'nogo pokrova* [The role of invasive plants in modern processes of vegetation transformation]. Doctor's Dissertation of Sciences in Biology. Bryansk, 326 p. (in Russian)
20. Dobrovol'skiy, G. (ed.), 1997. *Pochva, gorod, ekologiya* [Soil, city, ecology]. Moscow. 320 p. (in Russian)
21. Prokhorov, V., 2018. Allelopathic potential of adventive species with high invasive activity in flora of Belarus. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 63(2), pp. 163-170. (in Russian)
22. Dgebuadze Yu., Petrosyan V., Khlyap L. (ed.), 2018. Samyye opasnyye invazionnyye vidy Rossii (TOP-100) [The most dangerous invasive species of Russia (TOP-100)]. Moscow, T-vo nauch. izd. KMK, 688 p. (in Russian)
23. Serebryanaya, F., Ivanov, V., Denisenko, O., Be-rezhnaya, L., 2014. Morfologo-anatomicheskoye issledovaniye gortsa (reynutrii) sakhalinskoy [Morphological and anatomical study of the Sakhalin knotweed (reynutria)]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. (2), pp. 274-279. (in Russian)
24. Reshetnikova, N., Mayorov, S. and Krylov, A., 2019. *Chornaya kniga Kaluzhskoy oblasti. Sosudistyye rasteniya* [Black book of the Kaluga region. Vascular plants]. Kaluga: OOO «Vash Dom"». 342 p. (in Russian)
25. Novikova S. (ed.), 2017. *Flora Moskvy* [Flora of Moscow]. Moscow, Golden-Bi. 512 p. (in Russian)
26. Shamonova, M. and Kadetov N., 2020. *Vliyaniye rasteniy roda reynutriya na komponenty ekosistem dolin malykh rek v usloviyakh goroda* [The influence of plants of the genus Reynoutria on the components of ecosystems of small river valleys in urban conditions]. *Current issues of biodiversity protection in protected areas: Proceedings of All-Russian scientific-practical Conf., Ufa, RITS BashGU*, pp. 379-384. (in Russian)
27. *Ekologiya krupnogo goroda* (na primere Moskvy) [Ecology of a large city (using the example of Moscow)]. Moscow, «PAS'VA», 2001. 192 p. (in Russian)
28. Handbook of alien species in Europe/ Invading nature: springer series in invasion ecology. 3. Springer, 2009. 400 p.

29. Lowe, S., Browne, M., Boudjelas, S. De Poorter, 2000. 100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A selection from the *Global Invasive Species Database* (IUCN). The Invasive Species Specialist Group (ISSG) a specialist group of the Species Survival Commission (SSC) of the World Conservation Union (IUCN), 12 p.

30. Shaw, R. and Seiger L., 2002. Japanese knotweed. *Biological control of invasive plants in the Eastern United States*. USDA APHIS PPQ and USDA Forest Service, pp. 159-166.

Статья поступила в редакцию 18.11.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024; принята к публикации 15.01.2024.

The article was submitted 18.11.2023; approved after reviewing 12.01.2024; accepted for publication 15.01.2024.

## РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Краткое сообщение

УДК 502.4

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-18-23>

**Проблема практического использования результатов полевых научных наблюдений на заповедных территориях**

**Виктор Валерьевич Семенов**

ФГБУ "Государственный заповедник "Басеги", Пермский край, г. Гремячинск, Россия

[zbasegi@mail.ru](mailto:zbasegi@mail.ru)

**Аннотация.** В статье приводится краткая характеристика традиционной (советской) формы организации научных исследований в заповедниках, в значительной степени сохранившей свою актуальность и в наши дни. Помимо очевидных плюсов этой традиционной системы автор обращает внимание на её весомый объективный недостаток – сложность практического внедрения наработок заповедных учёных, связанную, прежде всего, с узко территориальной направленностью исследовательских работ на строго охраняемых площадях. На примере результатов исследований охотничье-промысловых животных заповедника "Басеги" предлагается ряд возможных вариантов активной интеграции и практического применения наработок заповедных учёных в социально-востребованных видах деятельности. В частности, анализируется возможная прикладная роль заповедной науки в охотничьем хозяйстве сопредельных территорий, экологическом просвещении широких слоёв населения в сети Интернет, в развитии познавательного экологического туризма, образования, работы телевидения. Обобщая собственные многолетние наблюдения и попытки реализовать взаимодействия заповедной науки с социумом в перечисленных сферах, автор делает предварительные выводы о возможном реальном числе благополучателей – людей, жизнь которых в результате использования наработок заповедных учёных приобретёт весомые позитивные изменения.

**Ключевые слова:** заповедник, исследовательская работа, практическое значение, благополучатели, экологический туризм, охотничье хозяйство, промысловые животные, заповедник "Басеги".

**Для цитирования:** Семенов В.В. Проблема практического использования результатов полевых научных наблюдений на заповедных территориях // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 18-23. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-18-23>

## SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Short Communications Article

**Regular on-site observations in strict nature reserves: the problem of data practical usage**

**Viktor V. Semenov**

Federal State Budgetary Institution "Basegi State Reserve", Perm Krai, Gremyachinsk, Russia

[zbasegi@mail.ru](mailto:zbasegi@mail.ru)

**Abstract.** The article provides a brief description of the traditional (Soviet) form of organizing scientific research in nature reserves, which has largely retained its relevance today. In addition to the obvious advantages of this traditional system, the author draws attention to its significant objective disadvantage – the difficulty of practical implementation of the achievements of protected scientists, primarily related to the narrow territorial focus of research on protected areas. Using the example of the results of research on hunting and commercial animals of the Basegi Reserve, a number of possible options for active integration and practical application of the achievements of reserve scientists in socially demanded areas are proposed and analyzed. In particular, the possible role of conservation science in the hunting economy of adjacent territories, environmental education of the general population on the Internet, in the development of cognitive eco-tourism, education, and television is analyzed. Summarizing his own long-term observations and attempts to implement the interaction of protected science with society in these areas, the author draws preliminary conclusions about the possible real number of beneficiaries – people whose lives will acquire significant positive changes as a result of using the achievements of protected scientists.

**Keywords:** strict nature reserve, research work, practical significance, benefit recipients, ecological tourism, hunting, game animals, Basegi Nature Reserve.

**For citation:** Semenov, V., 2024. Regular on-site observations in strict nature reserves: the problem of data practical usage. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(1). pp. 18-23. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-18-23> (in Russian)

Заповедники России традиционно имеют весьма благоприятную специфику организации научных исследований. Её базовыми особенностями являются:

1) Наличие в штате заповедного учреждения собственного структурного подразделения – научного отдела, включающего сотрудников разных специальностей.

2) Регламентированная государственным заданием возможность проводить многолетние, круглогодичные, комплексные исследования на одной постоянной и географически близкой природной территории.

Эти два момента существенно отличают исследовательскую практику федеральных особо охраняемых территорий от научных изысканий их коллег из вузов и НИИ. Учёные, работающие в системе российских ООПТ, имеют редкостную возможность проводить интенсивные всесезонные полевые наблюдения на базе ограниченной по площади "живой природной лаборатории", не отвлекаясь при этом на учебный процесс (специфика вузов) и на регулярные дальние командировки (специфика НИИ).

Естественно, что вышеуказанные особенности организации заповедных НИР, сложившиеся во времена СССР, в последние десятилетия претерпевают существенные изменения, связанные, прежде всего, с финансовыми и кадровыми ограничениями. Однако, даже несмотря на явную смену приоритетов деятельности российских ООПТ с научных исследований на развитие туризма, основной части заповедников удалось сохранить, как штатные исследовательские коллективы (научные отделы), так и базовые узко территориальные принципы организации их работы.

Явные плюсы вышеописанной традиционной специфики заповедной НИР, проявляются в:

- широком спектре взаимосвязанных исследовательских направлений;
- высокой степени детализации, комплексности и всесезонности сборов полевых материалов;
- возможностях широкого и разнопланового сопоставления многолетних рядов наблюдений.

Серьёзный принципиальный минус данной системы – вынужденная замкнутость заповедной НИР, её ориентированность исключительно на "свою" строго охраняемую природную территорию. Прямым следствием этого становится острая проблема практического внедрения получаемых заповедниками научных данных. Исследовательские материалы федеральных ООПТ, как правило, оказываются невостребованными основными заказчиками прикладных экологических исследований. Ведь промышленные и добывающие предприятия не работают на ООПТ.

В такой ситуации подготовка заповедниками объёмных, ежегодно обновляемых томов *Летописей природы* и сопутствующих им научных публикаций нередко превращается для сотрудников научных отделов в некую законченную самоцель. Такое положение, наносит "заповедной науке" серьёзный имиджевый вред. Современному миру трудно смириться с таким "исключительно фундаментальным" состоянием достаточно сложной, многопрофильной и затратной исследовательской работы. Отсюда периодически возникают и местами реализуются губительные для традиционной системы заповедной НИР радикальные инициативы.

Вплоть до отказа от содержания на бюджете федеральных ООПТ собственных научных отделов и переориентирования структуры исследований на спорадические (преимущественно летние) договорные работы с краткосрочным привлечением сторонних специалистов из удалённых НИИ и вузов. По мнению автора – это чрезвычайно негативная тенденция. Вышеописанные плюсы традиционной системы заповедной НИР чрезвычайно ценны. Их важно сохранить в неприкосновенности. Для этого необходимо поднять авторитет заповедной науки в окружающем социуме. То есть активно внедрять имеющиеся исследовательские наработки ООПТ в общественно-значимые формы практической деятельности.

Целью данной статьи является анализ возможных вариантов движения в этом прикладном направлении на примере наиболее близкой автору исследовательской темы – "Промысловые животные заповедника "Басеги" (Пермский край, западный макросклон Среднего Урала).

### **1. Внедрение в практику результатов ежегодных зимних маршрутных учётов (ЗМУ) охотничье-промысловых животных.**

Во второй половине фенологической зимы (с конца января до второй декады марта) в заповеднике "Басеги" ежегодно проводятся зимние маршрутные учёты промысловых животных. Эти наблюдения, позволяющие в соответствии с типовыми методами [9, 10, 11] рассчитать многолетнюю динамику плотности населения и абсолютной численности разных видов, осуществляются в Басегах, начиная с 1984 года. К настоящему времени по данному направлению НИР накоплен 41-летний банк данных, отражённый в соответствующих томах *Летописи природы* и ряде научных публикаций [1, 2, 5, 6, 7, 8].

По мнению автора, сама по себе эта многолетняя работа является характерным и весьма типичным для российских ООПТ примером довольно трудоёмкого фундаментального исследования, результаты которого в настоящий момент имеют ограниченную практическую отдачу. Представляя собой уникальный банк многолетних фактических данных, длинный ряд ежегодных рабочих материалов и итоговых расчётов ЗМУ используется в основном "для внутреннего пользования" заповедника. То есть для создания ежегодных тематических разделов "*Летописи природы*", подготовки текущих отчётов, выпуска авторских публикаций и докладов на конференциях.

Число сторонних благополучателей, ощущающих реальные положительные сдвиги в своей жизни и работе, от результатов этих исследований сравнительно невелико. Это десятки профильных специалистов, использующих информацию заповедных сотрудников в своей профессиональной природоохранной или научно-исследовательской деятельности. Прежде всего, в качестве источников цитирования для подготовки собственных научных исследований, публикация и отчётов. По мнению автора, столь ограниченную сферу практического применения результатов проведения ЗМУ необходимо расширить. Для этого попробуем проанализировать два возможных варианта.

*Вариант 1. Внедрение научных данных заповедных ЗМУ, в практику работы сопредельных охотничьих хозяйств*

Сама по себе строго охраняемая территория Басегов не представляет для окружающих охотпользователей практического интереса. Каким бы ни было на ней поголовье промысловых животных, их добыча всё равно законодательно запрещена. Однако данная ООПТ служит постоянным резерватом ценных охотничьих видов (лось, рысь, лесная куница, волк, заяц беляк, белка, выдра, норка, бобр и др.), регулярно мигрирующих на сопредельные неохраняемые участки. В этом аспекте заповедник и ведущиеся на его территории научные исследования могут играть для соседних охотпользователей весомую роль.

В случае с Басегами наиболее показательный и удобный пример – лось. Из-за глубоких зимних снегов в горах значительная часть его поголовья ежегодно уходит из заповедника в малоснежные угодья соседней Свердловской области [3, 4]. В ходе этой миграции животные во время своего передвижения и остановок пополняют охотничий ресурс сопредельных территорий. В конкретных цифрах эта картина сильно варьирует по годам, но в усреднённом общем виде выглядит примерно так. С июня по ноябрь поголовье лосей в заповеднике "Басеги" максимальное и насчитывает порядка 70-100 особей. В ноябре-январе с различной интенсивностью проходит ежегодная зимняя миграция. К февралю-марту на охраняемой территории остаётся минимальное лосиное поголовье – от 4-10 особей в многоснежные годы до 30-50 в менее типичные зимы с относительно малой высотой снежного покрова. С конца апреля до июня продолжается обратная миграция зверей с востока на запад. В результате, к середине лета количество лосей в Басегах вновь достигает ежегодного летне-осеннего максимума. Таким образом, при простом ежегодном соотнесении результатов ноябрьских и мартовских следовых учётов лосей можно довольно точно определить какая часть их поголовья уходит из заповедника "Басеги", обогащая таким образом охотничьи угодья соседних территорий.

Число потенциальных благополучателей по итогам такой исследовательской работы опять-таки будет не слишком большим. Это десятки человек – руководители и сотрудники нескольких охотхозяйств, которые с помощью результатов НИР заповедника получают дополнительные представления о закономерностях сезонных колебаний численности и перемещений ценного вида охотничьих животных и могут использовать эти сведения в своей профессиональной деятельности.

*Вариант 2. Внедрение научных данных заповедных ЗМУ в практику журналистской деятельности.*

Непосредственное участие в ежегодных ЗМУ, накопленные в ходе этих работ интересные сведения и обширный практический опыт позволяют научным сотрудникам заповедника квалифицированно готовить научно-популярные очерки и статьи. Они широко используются для информирования населения, в том числе с помощью постоянно работающего сайта заповедника "Басеги" и его странички Вконтакте.

На протяжении среднего по показателям печатной активности 2023 года за авторством специалистов научного отдела в этих Интернет источниках вышло 24

популярных статьи об охотничье-промысловых животных. В группе заповедника Вконтакте эти очерки собрали 1172 положительных отметки и 21 письменный отклик. Естественно, что на основании этих цифр нельзя сказать, что журналистская деятельность работающих в Басегах учёных имела Интернет-аудиторию из более чем 1100 благополучателей. Очевидно, что многие пользователи выходили на страничку заповедника неоднократно, выделяя при этом разные статьи. Тем не менее, нет сомнений, что совокупное число читателей вышеуказанной научно-популярной продукции объединяет несколько сотен человек. При этом, необходимо учитывать, что, несмотря на более значительный охват населения, реальный прикладной эффект от такой научно-просветительской работы всё равно будет сравнительно невелик.

В отличие от предыдущего варианта она не интегрирована в обязательный к исполнению трудовой процесс и воздействует лишь на личностные досуговые интересы сравнительно немногочисленной группы подписчиков заповедной странички Вконтакте (на момент подготовки статьи 2368 человек). В реальной жизни каждого из них адаптированные для широкого круга лиц научные материалы с территории заповедника "Басеги" играют очень незначительную роль дополнительного информационного фона. Фона качественного, довольно интересного, но совершенно не обязательного и слабо влияющего на повседневную жизнь подписчиков.

Таким образом, при попытках практическом внедрении научных наработок заповедника в жизнь окружающего социума важен не только масштаб охвата населения (абсолютное число потенциальных и фактических благополучателей), но и успешная интеграция полученных исследовательских материалов в конкретные, обязательные для исполнения трудовые (или учебные) процессы. В этом плане наиболее перспективным выглядит следующее актуальное направление заповедной НИР.

**2. Внедрение в практику результатов заповедной НИР по выявлению и мониторингу структуры довременных территориальных привязок (ТП) промысловых животных.**

Территориальные привязки (ТП) это места, где в определённые периоды (или моменты) годового цикла можно гарантированно наблюдать разные виды животных (растений, грибов, лишайников и др. групп живых организмов). В животном мире это индивидуальные участки, убежища, укрытия, места выведения потомства и брачных игр, регулярные пути передвижения и т.п. У каждой особи имеется своя система постоянных и временных ТП.

В условиях заповедника "Басеги" (горная тайга Среднего Урала) выявлять такие перспективные для наблюдений пункты довольно сложно. Приходится концентрировать внимание на наиболее легко определяемых разновидностях ТП. К таковым относятся, например, многолетние тетеревиные и глухариные тока, линии и коридоры регулярного перемещения лосей в периоды миграций, птичьи гнёзда и постоянные присады, жилые бобровые поселения, зимовальные ямы рыб на реках, возможно (в настоящее время такие

объекты не обнаружены) – многолетние медвежьи берлоги в скальных нишах и т.п. Гораздо легче в горной тайге обнаруживаются ТП растительного мира. Это разнообразные пункты произрастания конкретных видов, среди которых особую информационную ценность представляют редкие, уязвимые, особо ценные или зрелищные представители флоры.

Зная детали распределения по заповедной территории подобных ТП, можно максимально многообразно, эффективно и с минимальным ущербом для природы использовать разнообразные внутренние ресурсы заповедника, прежде всего информационные и рекреационные.

*Вариант 1. Внедрение научных данных о территориальных привязках промысловых животных в сферу познавательного туризма*

В настоящее время познавательный экотуризм, несомненно, является основным прикладным видом деятельности федеральных особо охраняемых территорий. Нередко это законодательно утверждённое направление работы заповедников воспринимают даже как единственную возможность принесения ими реально значимой общественной пользы, что, по мнению автора, в корне неверно. Тем не менее, миллионы туристов ежегодно посещающие различные российские ООПТ – одна из самых массовых категорий потенциальных благополучателей результатов заповедной НИР.

В настоящее время в Басегах поток организованных туристов сравнительно невелик (до 1000 человек в год), но при этом, согласно проведённым расчётам, довольно близок к предельному наполнению двух официально действующих экологических троп. При этом результаты заповедной НИР используются в контексте развития работы с посетителями весьма ограниченно, большей частью для предоставления туристам адаптированной информации при проведении экскурсий. Целенаправленные научные наблюдения были организованы также для определения изменений в природной среде, проявляющихся вследствие ежегодного прохождения летне-осеннего турпотока к вершине горы Северный Басег.

Изучение существующей в Басегах системы ТП промысловых животных может существенно развить и обогатить действующую систему туристических услуг. В частности, появятся возможности:

- прокладки новых экологических троп с учётом особенностей территориального распределения наиболее ценных и уязвимых привязок диких животных для минимизации воздействия на них фактора беспокойства;
- включения в программу туров дополнительных услуг с гарантированным наблюдением диких обитателей на наиболее удобных, зрелищных и при этом наименее уязвимых ТП;
- расширение географии и сезонных сроков познавательных туров посредством включения в их программу наблюдений за привлекательными ТП, расположенными в новых пунктах и функционирующие в малопосягаемые сезоны года.

У прикладной исследовательской работы, напрямую связанной с развитием "настоящего" познавательного и природосберегающего экотуризма, имеется

сравнительно немногочисленная категория потенциальных благополучателей. Это наиболее мотивированные, активные, подготовленные и любознательные посетители ООПТ. К сожалению, основная многотысячная масса современных туристов к таковым не относится. Так что возможный спрос на дополнительные эксклюзивные туристические услуги, разработанные в результате реализации долгой и кропотливой полевой НИР по выявлению и мониторингу ТП, не следует преувеличивать. Применительно к современному турпотоку в Басегах реальное ежегодное число таких заказчиков может измеряться десятками человек.

*Вариант 2. Внедрение научных данных территориальных привязках промысловых животных в сферу образования*

На базе многообразных сведений о структуре и динамике ТП можно с минимальными затратами создавать содержательные, красочные, богато иллюстрированные учебные пособия по различным темам, входящим в программы курсов биологии, географии, экологии и краеведения. При этом, благодаря материалам заповедной НИР, появляется возможность широкого использования в учебном процессе результатов наглядных полевых наблюдений, эксклюзивных фото и видеосъёмки объектов животного мира родного края.

Потенциальная категория благополучателей по этому направлению внедрения научных разработок очень велика. Это десятки тысяч учащихся, студентов и преподавателей региона, в котором расположен заповедник, а также аналогичные категории пользователей из сопредельных, близких по природным особенностям административных территорий. В случае с Басегами, как минимум, Пермский край и Свердловская область.

При этом, что особенно важно, использование в системе общего образования создаваемых на базе ООПТ учебных материалов должно быть официально регламентировано. Как показал многолетний опыт автора (2011-2017 гг.) попытки продвинуть вышеописанную работу частным порядком, опираясь исключительно на местные инициативы педагогов энтузиастов, не приводят к реальным значимым результатам. В этом и заключается основная проблема работы в данном чрезвычайно важном и социально значимом практическом направлении.

*Вариант 3. Внедрение научных данных о динамике территориальных привязках промысловых животных в сферу документального кино и работы СМИ*

Неоднократно апробированный автором в 2003-2017 годах процесс создания на базе заповедных ТП научно-популярных фильмов о дикой природе выглядит весьма привлекательным и перспективным. Особенно в связи с широкими возможностями продвижения данного видеоконтента на региональном ТВ, кинофестивалях, федеральных телеканалах и в сети Интернет.

Потенциальная категория благополучателей при этом необычайно обширна – миллионы телезрителей и пользователей Интернета. Однако данный вариант внедрения результатов НИР, оказывается, не вписанным в реальный трудовой или учебный процесс и направляется на развитие ни к чему не обязывающей сферы информационного досуга. То есть играет в реальной жизни большинства благополучателей крайне

незначительную роль по принципу: "Да, это очень интересно, но без этого вполне можно обойтись!" По этой причине весомый социальный эффект от внедрения достижений заповедной науки в сферу документального кино достигается преимущественно за счёт массовости зрительской аудитории.

*Вариант 4. Внедрение научных данных о территориальных привязках промысловых животных в сферу патриотического воспитания и самосовершенствования человека*

В контексте внедрения результатов научной работы ООПТ в сферу разнопланового воспитания и личностного роста широких масс населения наиболее ценно непосредственное привлечение как можно большего числа людей к участию в сложных и реально значимых исследовательских экспедициях. Естественно, этот процесс необходимо вывести за рамки строго охраняемой заповедной территории, используя возможность её посещения лишь в качестве стимула для лучших участников массовой исследовательской работы. Современный практический опыт заповедных учёных позволяет организовать процесс масштабных поисков и мониторинга ТП промысловых животных на местном, региональном и межрегиональном уровнях, со временем превратив его в масштабное молодёжное движение.

Потенциальная категория благополучателей при этом – сотни и тысячи участников всесезонных исследовательских экспедиций, повышающих в процессе сложных путешествий свои коммуникативные возможности, трудовую, духовную и физическую подготовку, расширяющие сферу знаний о родной земле. Данное направление практического внедрения результатов заповедной НИР имеет прямое отношение к стратегически важной и чрезвычайно актуальной проблеме повышения качества населения и его патриотического воспитания. В отличие от рассмотренных выше вариантов такая заповедная деятельность может сыграть в жизни тысяч благополучателей чрезвычайно важную роль, серьёзно отражаясь на их мировоззрении и базовых жизненных установках.

Подобные возможные и потенциально важные для широких слоёв населения варианты практического использования результатов заповедной НИР можно перечислять десятками. По мнению автора, всесторонне рассматривать их необходимо каждый раз, отправляясь в заповедное "поле". В противном случае действительно уникальный потенциал традиционной советской "заповедной науки" так и рискует остаться нераскрытым и маловостребованным со всеми вытекающими имиджевыми потерями и негативными последствиями.

#### Список источников

1. Бояришинов В.Д., Адиев М.Я. Численность тетеревиных птиц и ее динамика в заповеднике «Басеги» // Природные ресурсы Западно- Нечерноземья, их рациональное использование и охрана. Пермь, 1995. С. 42-46.
2. Кичигаев Э.Е. Бурый медведь в заповеднике «Басеги» // Исследования эталонных природных комплексов Урала. Екатеринбург: «Екатеринбург», 2001. С. 299-300.

3. Кичигаев Э.Е. Характер стадности лосей, мигрирующих через горный хребет Басеги // Исследования эталонных природных комплексов Урала. Екатеринбург: «Екатеринбург», 2001. С. 298-299.

4. Кичигаев Э.Е. Миграция лосей и их численность в заповеднике «Басеги» // Природные ресурсы Западно-Уральского Нечерноземья, их рациональное использование и охрана. Пермь, 1995. С. 29-35.

5. Кичигаев Э.Е., Бояришинов В.Д. Состояние численности охотничье-промысловой фауны заповедника «Басеги» // Экономика и охрана биологических ресурсов Прикамья. Пермь, 1986. С. 41-42.

6. Кичигаев Э.Е., Курулюк В.М. Состояние численности охотничье-промысловых животных в заповеднике «Басеги» // Состояние и динамика природных комплексов особо охраняемых территорий Урала: Тез. докл. науч.-практич. конф., посв. 70-летию Печеро-Ильчского зап.-ка. Сыктывкар, 2000. С. 78-79.

7. Кичигаев Э.Е., Курулюк В.М. Характер биотопического распределения крупных хищников в заповеднике «Басеги» // Исследования эталонных природных комплексов Урала. Екатеринбург: «Екатеринбург», 2001. С. 301-302.

8. Курулюк В.М. Состояние численности охотничье-промысловых животных в заповеднике «Басеги» // Проблемы особо охраняемых природных территорий европейского Севера (к 10-летию национального парка «Югыд ва»). Сыктывкар, 2004. С. 84-85.

9. Методические рекомендации по определению численности копытных, пушных животных и птиц методом зимнего маршрутного учёта. Приложение 1 к приказу ФГБУ "Центрохотконтроль" от 13.11.2014 № 58, 49 с.

10. Методические рекомендации по организации, проведению и обработке данных зимнего маршрутного учёта охотничьих животных в России (с алгоритмами расчёта численности). Министерство сельского хозяйства РФ, Москва, 2009, 44 с.

11. Приклонский С.Г. Инструкция по зимнему маршрутному учёту охотничьих животных. М.: Из-во Колос, 1972. 16 с.

#### References

1. Boyarshinov, V. and Adiyev, M., 1995. Chislenost' teterevinykh ptits i yeye dinamika v zapovednike «Basegi» [The number of grouse birds and its dynamics in the Basegi Nature Reserve]. *Prirodnnye resursy Zapadno-Ural'skogo Nechozozem'ya, ikh ratsional'noye ispol'zovaniye i okhrana*. Perm, pp. 42-46. (in Russian)
2. Kichigayev, E., 2001. Buryy medved' v zapovednike «Basegi» [Brown bear in the Basegi Nature Reserve]. *Issledovaniya etalonnykh prirodnykh kompleksov Urala*. Ekaterinburg, "Ekaterinburg", pp. 299-300. (in Russian)
3. Kichigayev, E., 2001. Kharakter stadnosti losey, migriruyushchikh cherez gornyy khrebet Basegi [The nature of the herd of moose migrating through the Basegi mountain range]. *Issledovaniya etalonnykh prirodnykh kompleksov Urala*. Ekaterinburg, "Ekaterinburg", pp. 298-299. (in Russian)
4. Kichigayev, E., 1995. Migratsiya losey i ikh chislenost' v zapovednike «Basegi» [Migration of moose and their numbers in the Basegi Nature Reserve]. *Prirodnnye resursy Zapadno-Ural'skogo Nechozozem'ya, ikh*

*ratsional'noye ispol'zovaniye i okhrana*. Perm, pp. 29-35. (in Russian)

5. Kichigayev, E. and Boyarshinov, V., 1986. Sostoyaniye chislennosti okhotnich'ye-promyslovyoy fauny zapovednika «Basegi» [The state of the number of hunting and commercial fauna of the Basegi Nature Reserve]. *The state of the number of hunting and commercial fauna of the Basegi*. Perm, pp. 41-42. (in Russian)

6. Kichigayev, E. and Kurulyuk, V., 2000. Sostoyaniye chislennosti okhotnich'ye-promyslovykh zhiivotnykh v zapovednike «Basegi» [State of the number of hunting and commercial animals in the Basegi Nature Reserve]. *State and dynamics of natural complexes of specially protected areas of the Urals: Abstracts of the report of the scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Pechero-Ilychsky Nature Reserve, 2000*, Syktyvkar, pp. 41-42. (in Russian)

7. Kichigayev, E. and Kurulyuk, V., 2001. Kharakter biotopicheskogo raspredeleniya krupnykh khishchnikov v zapovednike «Basegi» [The nature of the biotopic distribution of large predators in the Basegi Nature Reserve]. *Issledovaniya etalonnykh prirodnykh kompleksov Urala*. Ekaterinburg, "Ekaterinburg", pp. 301-302. (in Russian)

8. Kurulyuk, V., 2004. Sostoyaniye chislennosti okhotnich'ye-promyslovykh zhiivotnykh v zapovednike

«Basegi» [The state of the number of game animals in the Basegi Nature Reserve]. *Problemy osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy yevropeyskogo Severa (k 10-letiyu natsional'nogo parka «Yugyd va»)*. Syktyvkar, pp. 84-85. (in Russian)

9. Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu chislennosti kopytnykh, pushnykh zhiivotnykh i ptits metodom zimnego marshrutnogo uchota [Methodological recommendations for determining the number of ungulates, fur-bearing animals and birds using the winter route census method]. Appendix 1 to the order of the Federal State Budgetary Institution "Tsentrokhotkontrol" № 58 from 13.11.2014, 49 p. (in Russian)

10. Metodicheskiye rekomendatsii po organizatsii, provedeniyu i obrabotke dannykh zimnego marshrutnogo uchota okhotnich'ikh zhiivotnykh v Rossii (s algoritmami raschota chislennosti) [Methodological recommendations for organizing, conducting and processing data from winter route censuses of game animals in Russia (with algorithms for calculating numbers)]. Ministry of Agriculture of the Russian Federation, Moscow, 2009, 44 p. (in Russian)

11. Priklonskiy, S., 1972. *Instruktsiya po zimnemu marshrutnomu uchotu okhotnich'ikh zhiivotnykh* [Instructions for winter route recording of game animals]. Moscow, Kolos publ. 16 p.

Статья поступила в редакцию 15.04.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2024; принята к публикации 17.04.2024.

The article was submitted 15.04.2024; approved after reviewing 17.04.2024; accepted for publication 17.04.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 504.75+691.4; 504.4.54

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-24-36>

### О жизнеспособности складированных отходов переработки сульфидных руд на ранних стадиях почвообразования

Валентина Сергеевна Артамонова<sup>1</sup>, Светлана Борисовна Бортникова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геодезии им. А.А. Трофимука, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup> [artamonovavs@yandex.ru](mailto:artamonovavs@yandex.ru), [artamonova@issa-siberia.ru](mailto:artamonova@issa-siberia.ru)

<sup>2</sup> [bortnikovasb@ipgg.sbras.ru](mailto:bortnikovasb@ipgg.sbras.ru)

**Аннотация.** В статье рассматривается жизнеспособность техногенных отходов многолетних хвостохранилищ и насыпных отходов обогащения золотосодержащих руд на ранних стадиях почвообразования для овса посевного и азотфиксирующих микроорганизмов, с целью обоснования использования их в экологически безопасной консервации поверхности. Установлено, что в почвоподобных средах присутствуют многие металлы и металлоиды в подвижной форме, образуя вторичные сульфаты, основной из которых гипс. Представлены новые данные о транслокации химических элементов в корнях и ростках овса посевного, о развитии в техногенных условиях колонизирующих фото- и гетеротрофных микроорганизмов. Сообщается, что наиболее жизнеспособной для растений и микроорганизмов оказались среды обитания с веществом отходов при нейтральных значениях кислотности, сухой вес проростков в этих пробах был существенно выше, чем на фоне кислых. С помощью электронной микроскопии установлены факты фоссилзации жизнедеятельных цианобактерий и водорослей. Полученная информация может быть использована при характеристике первичного почвообразования и современных механизмов биогенного концентрирования металлов в условиях техногенеза, учтена при обосновании и разработке природоподобных технологий экологически безопасной консервации сульфидсодержащих отходов агломерации руд.

**Ключевые слова:** техногенные отходы, почвообразование, рекультивация, растения, микроорганизмы

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственной темы ИПА СО РАН (FWGR-2021-0005, проект 121.031.700.316-9) и ИНГГ СО РАН (FWZZ-2022-0028) по бюджетному финансированию Министерства науки и образования Российской Федерации.

**Для цитирования:** Артамонова В.С., Бортникова С.Б. О жизнеспособности складированных отходов переработки сульфидных руд на ранних стадиях почвообразования // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 24-36. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-24-36>

## SECTION 2. POLLUTION

Original paper

### On the viability of stored waste from processing sulfide ores during the early stages of soil formation

Valentina Sergeevna Artamonova<sup>1</sup>, Svetlana Borisovna Bortnikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geodesy, Novosibirsk, Russia

<sup>1</sup> [artamonovavs@yandex.ru](mailto:artamonovavs@yandex.ru), [artamonova@issa-siberia.ru](mailto:artamonova@issa-siberia.ru)

<sup>2</sup> [bortnikovasb@ipgg.sbras.ru](mailto:bortnikovasb@ipgg.sbras.ru)

**Abstract.** The article considers the viability of man-made waste from long-term tailings and bulk waste from the enrichment of gold-bearing ores in the early stages of soil formation for oats and nitrogen-fixing microorganisms, in order to justify their use in environmentally safe surface conservation. It has been established that many metals and metalloids are present in mobile form in soil-like environments, forming secondary sulfates, the main of which is gypsum. New data on the translocation of chemical elements in the roots and sprouts of oats, on the development of colonizing photo- and heterotrophic microorganisms in technogenic conditions are presented. It is reported that habitats with waste matter turned out to be the most viable for plants and microorganisms at neutral acidity values, the dry weight of seedlings in these samples was significantly higher than against the background of acidic ones. The facts of fossilization of vital cyanobacteria and algae have been established using electron microscopy. The information obtained can be used to characterize

primary soil formation and modern mechanisms of biogenic concentration of metals in conditions of technogenesis, taken into account in the justification and development of nature-like technologies for the environmentally safe conservation of sulfide-containing waste from ore agglomeration.

**Keywords:** man-made waste, soil formation, reclamation, plants, microorganisms

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state IPA SB RAS and IPGG SB RAS (FWZZ-2022-0028) on budget financing of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation.

**For citation:** Artamonova, V., Bortnikova, S., 2024. On the viability of stored waste from processing sulfide ores during the early stages of soil formation // *Anthropogenic Transformation of Nature*. 10(1). pp. 24-36. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-24-36> (in Russian)

## Введение

Насыпные отвалы и осушенные хвостохранилища сульфидных отходов обогащения полиметаллических золотосодержащих руд присутствуют на территории рудных полей Кемеровской области с прошлого века. Колонизирующая высшая растительность представлена на их поверхности единичными видами, что не препятствует транзиту с воздушными и водными потоками мелкодисперсных фракций отходов, содержащих потенциально токсичные элементы в составе вторичных соединений, а также ценные компоненты, в частности – благородные металлы.

Доказано, что в отходах обогащения золотосодержащих полиметаллических руд интенсивное окисление техногенного вещества на открытом воздухе обуславливает переход структурных и поверхностно-связанных микро- и ультрадисперсных фракций металлов в водорастворимые и ионообменные формы – до 17% [11]. Они наиболее уязвимы в период проявления водной и ветровой эрозии, по окончании которой обнажёнными оказываются горизонты, находящиеся до этого в захороненном виде где, например, золото, находилось большей частью в виде интерметаллида систем Au-Cu, Au-Ag, Au-Ag-Cu, в составе сульфосолей, теллуридов, антимонидов, висмутидов, сульфосоединений [4]. В тиосульфатных, гиросульфидных и гидроксокомплексах благородных металлов обеспечивает формирование высокопробных золотин, вплоть до 973%. Помимо этого, регистрируется вторичное образование минералов, содержащих Au, Fe, Pb, Cu и новообразование Ag [23]. В аэробных условиях они окисляются, образуя растворимые формы золота и других сидерофильных металлов, которые подвергаются поверхностному сносу и частичному перемещению в толщу отвалов.

В настоящее время спрос на промышленное извлечение мелкозернистых фракций золота (размером < 1-2 мм) из техногенных отходов растёт, поскольку в стране ежегодно снижаются запасы золотосодержащего минерального сырья [22]. Техногенные отходы рассматриваются как основной сырьевой ресурс благородного металла после коренных руд и россыпных месторождений. В 2010 г. ресурсный потенциал золота техногенных отходов оценивался в 50-60% добытого в России [14]. В этой связи, сохранение отходов переработки золотосодержащих руд требует разработки технологий их экологической консервации. Создание задержанных участков на техногенных отходах предписывается нормативными требованиями для земель консервационного направления рекультивации [7]. Использование природоподобных технологий зелёной рекультивации, в том числе задернения, предполагает снижение миграции металлов с водными и ветровыми

потоками. Задернение – один из видов рекультивации ландшафта, он обеспечивает создание почвопокровных травяных ценозов на спланированной поверхности нарушенных (оголенных) земель, отвалов, выработанных и стеррассированных откосов.

Медленные темпы естественного фитозаселения поверхности хранилищ происходят в основном по причине присутствия в техногенном веществе водорастворимых форм тяжёлых металлов, в том числе Cu, Zn, Pb, а также вторичных минералов, преимущественно сульфата кальция [23]. В настоящее время запасы серы в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий Сибири промышленно значимы (около 1/3 сульфатной серы добывается микробиологическим способом) [15]. Следовательно, для экологической консервации насыпных отвалов и хвостохранилищ априори могут быть пригодными почвопокровные растения, не требовательные к почвенному плодородию, толерантные к кислотности, экотоксикантам и гипсу.

Таким требованиям отчасти соответствует овёс посевной. Ему присуще развитие мощной мочковатой корневой системы, преимущественно в верхнем слое (до 80-90%). Корни овса проникают на глубину 70–80 см, а в период формирования зерна – до 2 м. Корневая система растения представляет собой разветвлённую нитеобразную массу общей протяжённостью до 47 м. Известно, что формирование узловых корней овса посевного начинается через 7-10 дней после появления всходов. Даже после засушливой весны, при наличии в июне дождей, растения способны в летний период продолжать куститься, образовывать узловы корни. Помимо этого, для овса характерна способность к самоопылению (перекрестное опыление не превышает 2%), что обеспечивает пространственное расселение овса. В сельскохозяйственной практике Нечернозёмной зоны овёс высевают в качестве первой культуры на вновь освоенных землях – раскорчёвках, осушенных болотах, торфяниках, после вырубков, а также применяют для сидерации малоплодородных почв. Возможности использования овса для ускорения почвообразования на техногенных отходах и для их консервации изучены недостаточно. В этой связи, была поставлена цель – исследовать пригодность олиготрофной почвоподобной среды обитания в поверхностной толще техногенных отходов для проростков овса посевного, а также для фото- и гетеротрофных азотфиксирующих бактерий, обеспечивающих пополнение необходимого биогенного азота, особенно востребованного на начальных стадиях роста овса.

## Материалы и методы исследования

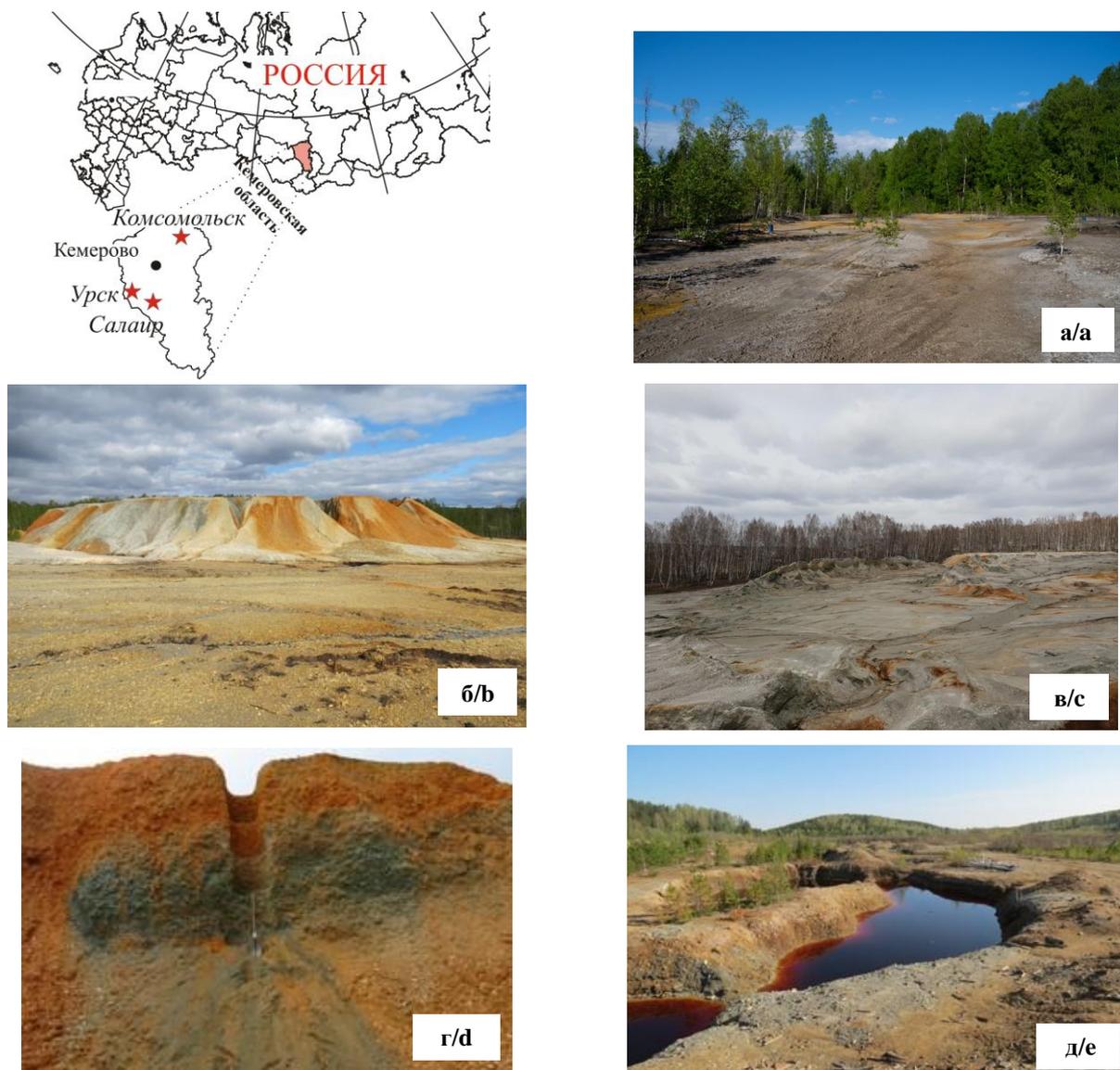
**Объекты.** Исследование проводилось с веществом разновозрастных хвостохранилищ обогащения руд

(Талмовские Пески, Дюков лог) и насыпных отвалов (Белоключевской, Урской, Бериккульский) (рис. 1 / fig. 1). Расположены техногенные объекты в пределах Кемеровской области [3]. Выбор проб осуществлялся с учётом разнообразия их минералого-геохимической характеристики.

Хвостохранилища отходов переработки руд Салаирского рудного поля.

1. Талмовские Пески – первое хвостохранилище Салаирского ГОКа. Переработка руд производилась на Золотоизвлекательной фабрике методами гравитации,

цианирования и флотации с 1932 по 1942 гг. В настоящее время хвостохранилище представляет собой ленту техногенных песков шириной ~ 30 м протяжённостью ~ 7 км, находящуюся вблизи реки Малая Талмовая. Мощность песков не превышает 3 м. Масса техногенного образования соответствует ~1 млн. т. Содержание сульфидов (пирит, сфалерит, галенит) не превышает 6 – 7 %, карбонатов (кальцит, доломит) – около 10 %. Пробы взяты с поверхностной толщи (0-20 см) на участках с веществом разной кислотности: (точки 1 и 2 соответственно).



**Рис. 1. Географическое положение объектов исследования и внешний вид: а – Талмовские Пески; б - Урской отвал кварц-баритовой сыпучки; в - Урской отвал кварц-пиритовой сыпучки; г – Белоключевской отвал; д – Бериккульский отвал**

**Fig. 1. Geographical position of study objects and total overview: а – Talmovskye Sands; б – Ursk dump, quartz-barite sands; в – Ursk dump, quartz-pyrite sands; д – Belocluch dump; е – Berikul dump**

2. Хвостохранилище Дюков лог вмещает отходы обогащения и переработки руды на Золотообогатительной фабрике из зоны окисления месторождений, состоит из сильноизменённых пород и минералов. Оно заполнялось в 1967-1975 гг. Масса отходов достигает 1.5 млн. т. Сульфидным минералам принадлежит

около 5 %, в них лидирует пирит, за ним следует галенит и сфалерит, реже встречается халькопирит. Доля карбонатов составляет 2-3 %. Пробы для экспериментов отобраны с верхних горизонтов хвостохранилища, характеризующихся различающимся составом, кислотностью и степенью окисленности – точки (т. 3, 4, 5).

Насыпные отвалы на территории Урского рудного

поля.

1. Белоключевской отвал сформирован в 30-40-х гг. прошлого века из отходов цианирования руд из зоны окисления одноимённого месторождения, расположен в пос. Урск. Масса отходов достигает 400 тыс. т. Характерной особенностью отвала является переслаивание контрастных по составу горизонтов кварц-баритовой и кварц-пиритовой сыпучек. В первой сыпучке содержание сульфидов составляет 2-4%, во второй – 25%. Доля карбонатов в том и другом случае не превышает 0.5 %. Пробы для анализа отобраны с вершины отвала (т. 6, кварц-баритовая рыжая сыпучка) и из среднего горизонта разреза (т. 7, кварц-пиритовая сыпучка голубовато-серого цвета).

Урской отвал образован в 30-40-е гг. прошлого века, представлен отходами цианирования кварц-баритовой и кварц-пиритовой сыпучек Ново-Урского месторождения, которые складировались по отдельности в две насыпи в пойме ручья. Их высота составляет 10 - 20 м. Масса отвала около 400 т. По составу насыпи аналогичны Белоключевскому отвалу. Отбор проб производился из отвала кварц-баритовой сыпучки (т. 8) и остатков второго отвала, состоящего из отходов нижней части зоны окисления – кварц-пиритовой сыпучки (т. 9).

2. Берикульский отвал расположен в пос. Комсомольск в Кузнецком Алатау, состоит из отходов цианирования сульфидного флотоконцентрата золотоизвлекательного завода, перерабатывавшего руды Старо-Берикульского месторождения. Масса отвала 100 т. Содержание сульфидов в отходах цианирования флотоконцентрата достигало 25 %. Отбор проб производился с поверхности из закопшек гл. 20-30 см. (тт. 10, 11).

Для исследований были использован мелкозём отквартированных (квартирование – разделение на навески гомогенизированной пробы) образцов, отличающихся визуально по степени окисленности техногенного вещества.

**Характеристика вещества.** Для определения кислотности сред обитания проводили измерения значений pH в пастах (твердое/вода = 2/1) pH/T-метром HI 9025 S, HANNA Instruments, США. Водные вытяжки для определения концентраций подвижных форм элементов были приготовлены в соотношении твердое/вода = 1/10, в них также замерены значения pH. Микроэлементный состав вытяжек определялся методом ИСП-МС на приборе Agilent 8800 (Agilent Technologies, США).

**Биологический материал.** Использованы для испытаний проростки овса посевного *Avena sativa* L. Предпочтение овсу посевному в нашем исследовании было не случайным. Он включён в Национальный стандарт РФ, в котором овёс предложен в качестве тест-объекта для определения воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост высших растений на ранних стадиях развития [8]. Овёс также присутствует в нормативном документе для снижения вредоносности отходов с целью экологической консервации [6].

Помимо этого, овёс посевной обладает большим адаптационным потенциалом, метаболической активностью в широком диапазоне реакции среды (от среднекислой до сильнощелочной). Будучи сидератом,

овёс способен вовлекать гипс (сульфат кальция) в качестве источника питания Са и сульфатов. В свою очередь, гипс повышает устойчивость растений к возбудителям и вредителям, помогает впитывать влагу в корнеобитаемом слое, которая требуется при прорастании семян в количестве около 60% от их веса. Сидеральные функции овса большие, важную роль в их реализации играет синтез авеноцина – антибиотика, способствующего защите от атаки и инфицирования микробиотами [19]. Помимо этого, овёс посевной способен растворять и усваивать труднодоступные фосфаты, благодаря синтезу в процессе дыхания ряда органических кислот, которые выделяются за пределы корней. В условиях дефицита доступного фосфора они растворяют связанные формы металла. Этот механизм носит приспособительный характер. Установлена адаптация двухнедельных проростков овса посевного к росту на фоне присутствия тяжёлых металлов: Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, Cd [12].

Транслокация металлов внутрь проростков активизирует активность пигментов фотосинтеза, флавоноидов, каталазы и пероксидазы в условиях разных уровней загрязнения. Во взрослых растениях тяжёлые металлы обнаружены в стеблях, корнях и зерне [18]. В корнях регистрировались наибольшие количества Hg, Pb, Cd, Cr, в надземной части – Zn, Ni, Cu, Co. Клетки корней овса имеют устойчивую к действию алюминия плазмолемму, наряду с активным подщелачиванием среды интенсивно выделяют вещества, хелатирующие и осаждающие металл. Сульфаты обеспечивают усиленное поглощение Al на ранних этапах онтогенеза, тем самым запуская механизмы его нейтрализации [9]. Отрицательное действие высокой кислотности на жизнедеятельность и продуктивность растений овса проявляется на фоне повышенной растворимости соединений алюминия, железа и марганца [17].

Всё вышеизложенное предопределило исследование пригодности вещества техногенных отходов на ранних стадиях почвообразования для проростков овса. Испытания проводили в лабораторных условиях, проанализировано 25 проростков (в 5-кратной повторности), предварительно выращенных на мелкозёме в чашках Петри с учётом рекомендации о целесообразности использования не менее 100 штук [20]. Максимальную длину корней и высоту ростков овса учитывали через 7 суток [5]. Затем корни и надземную часть высушивали (по отдельности), после чего взвешивали. В сухой массе (после озоления) определяли содержание химических элементов методом ИСП-МС на масс-спектрометре NexION 300D (PerkinElmer, США) (ПНИЛ «Вода» ГГХ ИШПР ТПУ). Содержание химических элементов, приведенное в работе, соответствует средним арифметическим показателям, стандартные ошибки которых не превышают 5-10 %. Содержание органического углерода (в 3-х кратной повторности) определяли методом Тюрина в лаборатории географии и генезиса почв ИПА СО РАН общепринятым в почвоведении методом.

Присутствие жизнедеятельных гетеротрофных бактерий (азотобактера) регистрировали по фактам обростания ими мелкозёма, размещённого на поверхности твёрдой среды Эшби согласно методу комочков, традиционному в микробиологии [10, 26]. В 5 чашек

Петри на агаризованную среду раскладывали мелкозём в количестве 50 комочков в каждую. Появление обрастаний бактерии регистрировали через 12, 24, 36, 48, 60 часов, поскольку сроки обрастания почв, приводимые в литературе, разнятся от 1 суток до 7 [20, 21]. Для сравнительной оценки заселённости (встречаемости) мелкозёма каждой пробы азотобактером определяли процент обрастания комочков [21]. Выявление жизнедеятельных и фоссилизированных цианобактерий и водорослей осуществляли с помощью световой и электронной микроскопии.

Содержание органического углерода (в 3-х кратной

повторности) определяли по методу Тюрина в лаборатории географии и генезиса почв ИПА СО РАН.

#### Результаты и обсуждение

Пробы, взятые с поверхности многолетних насыпных отвалов и хвостохранилищ отходов переработки золотосодержащих руд, содержали широкий набор химических элементов в окисленных и неокисленных субстратах. Содержание сульфатной серы, железа, мышьяка, кадмия, обнаружено в максимальном количестве в неокисленных субстратах, особенно насыпных отвалов (табл. 1. / tabl. 1)

Таблица 1

**Физико-химические показатели мелкозёма отходов переработки руд: в твердом веществе  $C_{орг}$  -  $S_{сульфат}$  в %, Cu – As в г/т; в вытяжках  $SO_4^{2-}$  - Zn в мг/л, Pb – Ni в мкг/л**

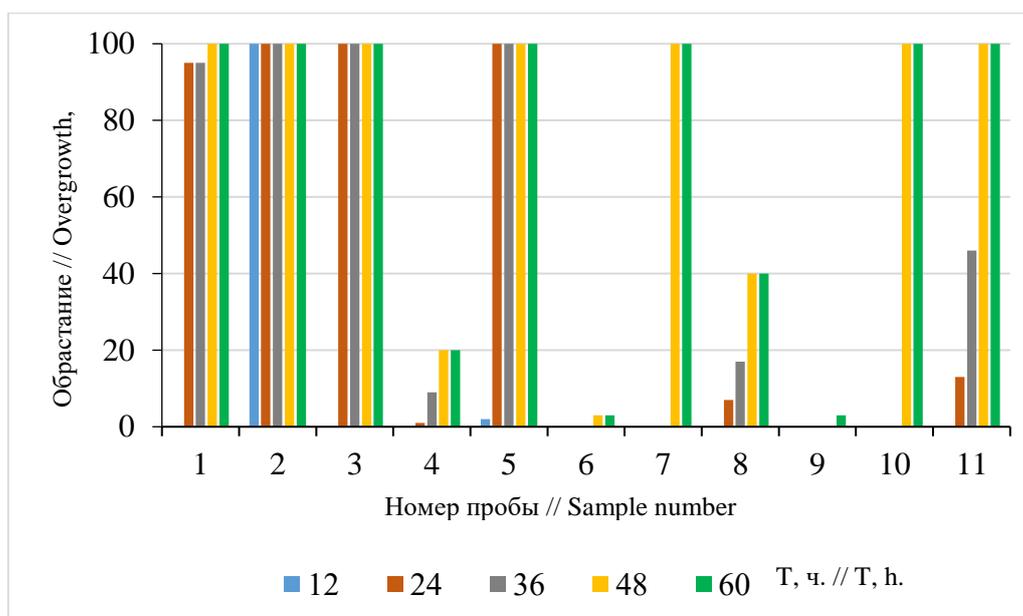
Table 1

**Physico-chemical parameters of fine-grained tailings from processing of ores: in solid substance  $C_{орг}$  -  $S_{сульфат}$  in %, Cu – As in ppm; in water extracts  $SO_4^{2-}$  - Zn, Pb – Ni in  $\mu\text{g/l}$**

| Показатель // Indicator         | Номер пробы // Sample number |          |         |         |         |         |          |         |         |          |          |
|---------------------------------|------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|
|                                 | 1 ТПШ1-1                     | 2 ТПШ4-1 | 3 ДЛ1-0 | 4 ДЛ1-1 | 5 ДЛ2-1 | 6 БКЧох | 7 БКЧпох | 8 УрБар | 9 УрПир | 10 Бер-1 | 11 Бер-3 |
| Твердое вещество / Solid matter |                              |          |         |         |         |         |          |         |         |          |          |
| $C_{орг}$ // $C_{орг}$          | 0,46                         | 0,69     | 0,74    | 0,37    | 1,44    | 2,44    | 0,6      | 0,43    | 1,40    |          | 1,91     |
| $SiO_2$                         | 39,3                         | 42,1     | 85,4    | 62,9    | 44,7    | 69,5    | 49,2     | 77,1    | 23,4    | 50,8     | 18,0     |
| $Fe_2O_3^*$                     | 8,17                         | 4,57     | 2,91    | 4,63    | 4,73    | 4,24    | 15,66    | 7,50    | 17,79   | 11,5     | 31,1     |
| CaO                             | 1,49                         | 4,57     | 0,22    | 2,43    | 9,19    | 0,12    | 0,14     | 0,12    | 0,05    | 5,27     | 5,42     |
| $S_{сульфат}$                   | 9,1                          | 5,26     | 1,49    | 3,47    | 9,19    | 7,7     | 7,4      | 1,35    | 16,2    | 1,42     | 10,0     |
| Cu                              | 220                          | 480      | 370     | 73      | 460     | 79      | 770      | 270     | 620     | 42       | 750      |
| Zn                              | 680                          | 7600     | 650     | 270     | 8400    | 62      | 110      | 110     | 320     | 150      | 330      |
| Pb                              | 3300                         | 2400     | 2000    | 470     | 4500    | 1500    | 2000     | 1800    | 3100    | 370      | 4300     |
| Cd                              | 1,1                          | 30       | 2,0     | 0,71    | 33      | 0,19    | 0,42     | 0,15    | 1,2     | 0,45     | 0,48     |
| As                              | 180                          | 94       | 120     | 270     | 440     | 370     | 630      | 390     | 380     | 5600     | 8100     |
| Водные вытяжки / Water extracts |                              |          |         |         |         |         |          |         |         |          |          |
| pH                              | 3,26                         | 7,66     | 7,06    | 3,16    | 7,37    | 2,95    | 2,82     | 3,56    | 2,83    | 4,76     | 4,51     |
| $SO_4^{2-}$                     | 620                          | 46       | 6,9     | 720     | 7,5     | 7400    | 1900     | 170     | 1300    | 110      | 4600     |
| Mg                              | 9,8                          | 8,3      | 0,40    | 9,3     | 0,91    | 9,5     | 2,5      | 9,7     | 1,5     | 4,3      | 49       |
| Fe                              | 9,5                          | 0,078    | 0,23    | 0,56    | 0,47    | 3000    | 520      | 0,7     | 480     | 11       | 1500     |
| Al                              | 13                           | 0,028    | 0,14    | 1,7     | 0,18    | 73      | 15       | 13      | 18      | 0,92     | 140      |
| Cu                              | 1,2                          | 0,018    | 0,014   | 0,049   | 0,065   | 3,9     | 1,3      | 0,2     | 0,63    | 0,17     | 8,7      |
| Zn                              | 16                           | 0,52     | 0,069   | 0,78    | 1,0     | 1,7     | 0,73     | 0,47    | 0,96    | 0,25     | 10       |
| Pb                              | 17                           | 52       | 91      | 72      | 380     | 37      | 1000     | 3,2     | 2600    | 2,4      | 0,90     |
| Cd                              | 48                           | 9,0      | 0,24    | 4,8     | 1,5     | 1,5     | 3,5      | 0,75    | 1,7     | 6,1      | 190      |
| As                              | 2,9                          | 15       | 3,3     | 1,6     | 53      | 1900    | 15000    | 0,8     | 1800    | 50       | 87000    |
| Sb                              | 1,5                          | 3,2      | 0,77    | 0,54    | 28      | 7,6     | 1300     | 0,57    | 47      | 1,5      | 12       |
| Co                              | 9,5                          | 0,25     | 0,11    | 4,9     | 0,71    | 9,9     | 39       | 3,3     | 22      | 12       | 650      |
| Ni                              | 31                           | 0,61     | 0,33    | 13      | 2,5     | 24      | 39       | 33      | 22      | 13       | 890      |

В водных вытяжках содержание сульфатов, металлов и металлоидов изменяется в широких пределах, свидетельствуя о большой разнице в концентрации подвижных форм элементов. Анализ заселённости техно-

генных отходов азотфиксирующей гетеротрофной бактерией – *Azotobacter chroococcum* показал, что в таких условиях вегетативные клетки делятся разными темпами (рис. 2 / fig. 2)



**Рис. 2. Средние значения числа обросших комочков мелкозёма техногенных отходов колониями азотобактера за 12-60 часов (n=150)\***

\* **Примечание.** Талмовские Пески: 1 – окисленное вещество, поверхность; 2 – рыжевато-серый слой с остаточными сульфидами; Дюков лог: 3 – верхний горизонт, слабоокисленное вещество; 4 – рыжее окисленное вещество; 5 – рыжевато-серый слой с преобладанием песчаной фракции; Белоключевской отвал: 6 – кварц-баритовая сыпучка; 7 – кварц-пиритовая сыпучка; Урской отвал: 8 – кварц-баритовая сыпучка; 9 – кварц-пиритовая сыпучка; Бериккульский отвал: 10 – верхний горизонт, окисленное вещество; 11 – высокосульфидный слой. По оси ординат - % обрастания проб мелкозёма. По оси абсцисс - время обрастания проб мелкозёма: ряд 1 – 12 час., ряд 2 – 24 час., ряд 3 – 36 час., ряд 4 – 48 час., ряд 5 – 60 час.

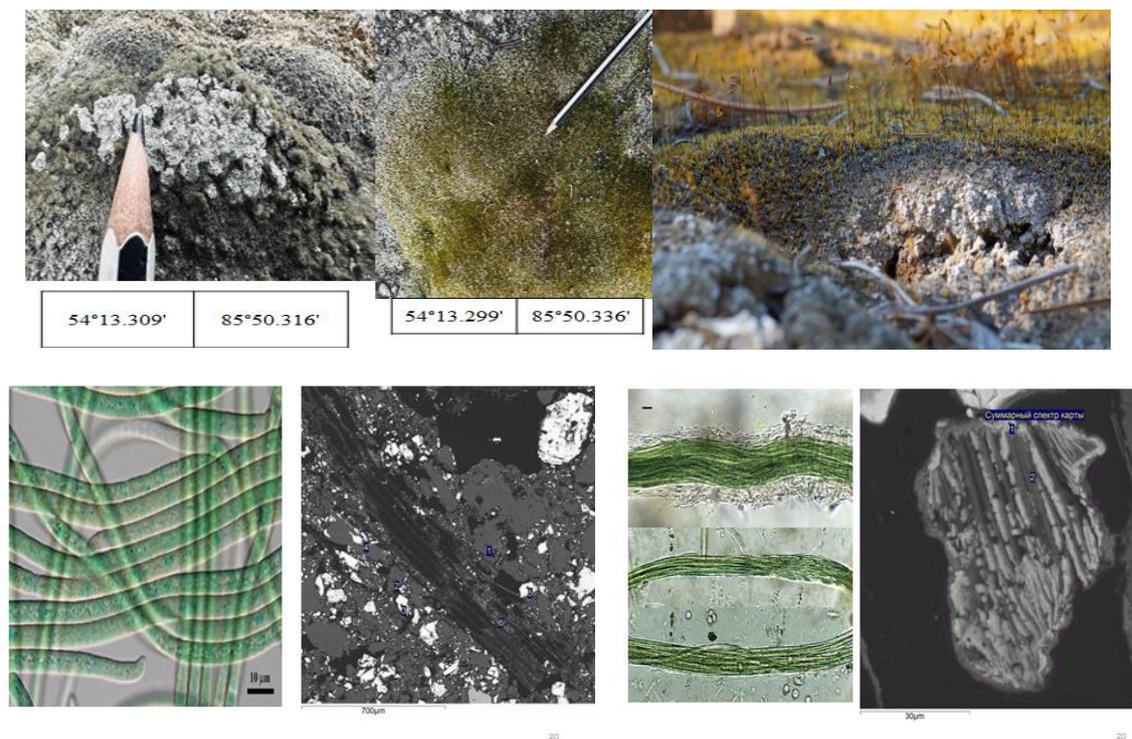
**Fig. 2. Average values of the number of overgrown lumps of fine-grained tailings by colonies of azotobacter in 12-60 hours (n=150)\***

\* **Note.** Talmovskye Sands: 1 – oxidized substance, surface; 2 – reddish-gray layer with residual sulfides; Dukov Log: 3 – upper horizon, weakly oxidized substance; 4 – reddish oxidized substance; 5 – reddish-gray layer with a predominance of the sand fraction; Belocluch dump: 6 – quartz-barite sands; 7 – quartz-pyrite sands; Ursk dump: 8 – quartz-barite sands; 9 – quartz-pyrite sands; Berikul dump: 10 – surface, oxidized substance; 11 – high sulfide layer.

Наиболее высокая заселённость мелкозёма бактерией выявлена на участках хвостохранилища Талмовские Пески и Дюков лог с нейтральной средой, которая наиболее приближена к оптимальным значениям азотфиксации бактерии (пробы 2, 3, 5; pH пасты – 6,95, 7,63, 6,64, соответственно), где 100%-ное обрастание проб мелкозёма наблюдалось через 12 и 24 ч инкубации (рис. 2 / fig. 2). Кислая среда Бериккульского отвала (пробы 10, 11; pH пасты – 4,95 и 3,81, соответственно) препятствовала быстрому заселению мелкозёма бактерией – 100%-ное обрастание произошло только после 48 часов. В ультракислой среде на участке Дюкового лога, Урского и Белоключевского отвалов (пробы 4, 6 – 9; pH пасты: 0,64 – 2,27) полное обрастание мелкозёма было достигнуто только в одном случае – в мелкозёме Белоключевской кварц-баритовой сыпучки через 48 часов, в остальных случаях колониеобразование осталось на низком уровне за все время эксперимента.

Развитию гетеротрофной бактерии в мелкозёме окисленного участка хвостохранилища Талмовские

Пески способствует присутствие органической пищи, о чём свидетельствуют значения органического углерода (табл. 1 / tabl. 1). Продуцентами органического вещества были слизистые нитчатые цианобактерии: *Microcystis aeruginosa* Kützinger, *Microcoleus vaginatus* (Vauch.) Gom., *M. tennerimus* Gom., виды рода *Phormidium* и другие, а также зелёные водоросли р. *Scenedesmus*, диатомовые водоросли – *Surirella helvetica* Brun., виды р. *Cymbella*, *Nitzschia*, *Navicula* и др., присутствующие в жизнедеятельном состоянии (рис. 3 / fig. 3), в том числе и fossilized [2]. Наряду с ними определённый вклад в накопление азотсодержащего органического вещества вносили пластинчатые лишайники, а также куртинки литофильных мхов, использующие для своего питания присутствующие остатки разложившихся метаболитов и тел бактерий, водорослей, лишайников. Фото лишайников и мхов любезно предоставлены кандидатом геол.-мин. наук А.Ш. Хасиновой (Шавекиной), за что авторы статьи признательны ей.



**Рис. 3. Биопоселенцы поверхностной толщи хвостохранилища Талмовские пески**  
**Fig. 3. Biosettlers of the surface layer of the Talmovskie Sands tailings reservoir**

Фото- и гетеротрофные микроорганизмы полифункциональны – наряду с пополнением в среде обитания первичного азотсодержащего вещества, они приносят в неё ростстимулирующие и хелатообразующие соединения.

Слизистым экзометаболизмом азотобактера, цианобактерий и водорослей особая роль принадлежит в сорбции металлов, в том числе золота, благодаря полиуронидам или альгинатам, которые обеспечивают склеивание мелких фракций. Экспериментально установлено, что формирование наночастиц золота происходит активно в присутствии азотфиксирующих цианобактерий (р. *Anabaena*, *Nostoc*), а также видов р. *Azotobacter* [13]. Золото в таком случае может быть представлено псевдоморфозами самородного золота с цианобактериями, диатомовыми водорослями и другими микроорганизмами. Размеры таких образований составляют несколько микрон. Процесс биогенеза наночастиц Au, Ag, Pt внутриклеточно осуществляют также цианобактерии: *Plectonema boryanum*, *Calothrix*, *Leptolyngbya*, *Anabaena flos-aque*. Белки и полисахариды диатомовой водоросли р. *Nitzschia* участвуют в стабилизации наночастиц золота, что подтверждено FT-IR анализом [28]. Представители данных родов цианобактерий и диатомей также присутствуют в наших пробах.

Перечисленные выше гетеро- и фотогетеротрофные микроорганизмы ранее обнаружены в почвах и водотоках территории Салаирского кряжа [1, 27], в пределах которого расположены колчеданно-полиметаллические месторождения. Цианобактерии и водоросли

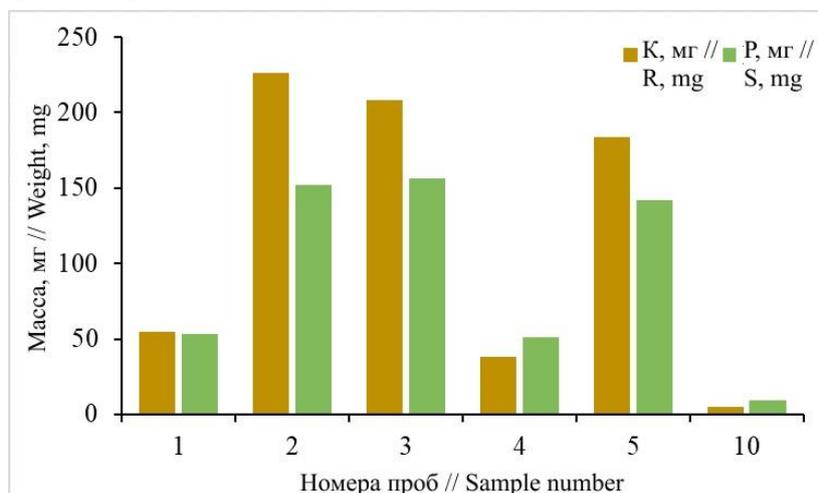
мигрируют на поверхность отходов агломерации золотосодержащих руд, участвуют в процессах первичного почвообразования и сорбции металлов. Жизнедеятельные особи цианобактерий быстро фоссилизуются (всего за несколько часов) [16]. Внутри и вокруг клеток образуются отложения  $\text{CaCO}_3$ , кристаллические формы которого могут быть представлены кальцитом и арагонитом. Доказано, что в штучных пробах нитчатые цианобактерии рода *Microcoleus* участвовали в формировании псевдоморфоз барита, ярозита с ангидритом [24, 25]. Анализ химического состава обывизвествлённых цианобактерий и водорослей и их участие в формировании вторичных минералов в настоящее время продолжается согласно действующей финансовой поддержке РФ.

Что касается колонизации азотобактером мелкозёма участка хвостохранилища Дюков лог, то она ослаблена по сравнению с таковой на участке хвостохранилища Талмовские Пески, по-видимому, вследствие кислой реакции среды (табл. 1. tabl. 1), которая тормозит деление вегетативных клеток. Не исключено также, что привнесённые из окружающей среды клетки азотобактера на момент отбора образцов частично находились в цистоподобном состоянии и их переход в активное состояние требовало времени. В пробах с Белоключевского и Урского месторождений кислотность среды составляла 0,89-1,79 ед. и вовсе не способствовала выживанию азотобактера и других биопоселенцев.

Испытания мелкозёма техногенных отходов на фитопригодность показали, что семена овса посевного прорастали лишь в 6 вариантах отходов переработки золотосодержащих руд, (из 11 обследуемых). Наиболее благоприятными для роста растений оказались почвоподобные среды хвостохранилищ Талмовские Пески и Дюков лог. Проростки овса посевного, выросшие в нейтральной среде, обнаружили значительное увеличение массы корней по сравнению с контролем,

в то время как на слабокислых субстратах – уменьшение (рис. 4 / fig. 4). Суммарный вес (сухой) корней и ростков овса посевного на веществе хвостохранилищ (Талмовские пески и Дюков лог) составил: т. 2 – 381 мг; т. 3 – 337 мг; т. 5 – 326 мг.

Насыпные отвалы с кислой средой, за исключением участка Дюкова лога, оказались непригодными для роста овса посевного.

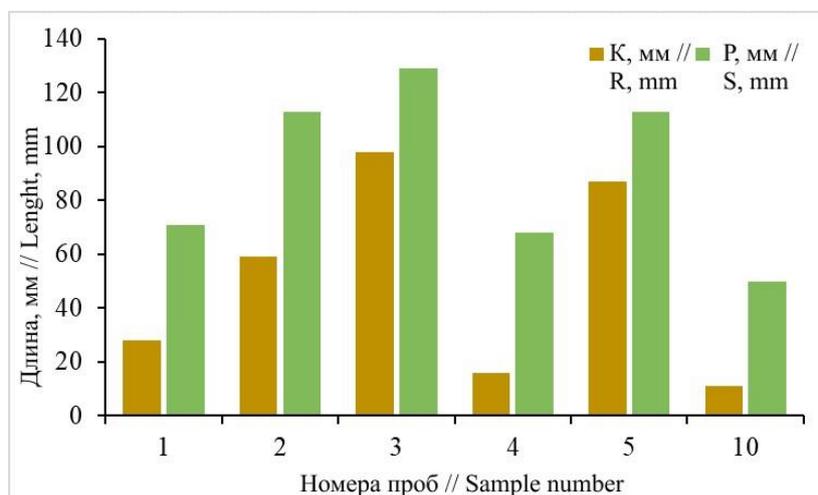


**Рис. 4.** Средние значения сухого веса (мг) корней (К) и надземной части проростков (Р) овса посевного (n=125), выращенного на субстрате отходов переработки золотосодержащих руд. Номера проб соответствуют номерам на рис. 2.

**Fig. 4.** Average values of dry weight (mg) of roots (R) and aboveground part of seedlings (S) of oats (n= 125) grown on a substrate of tailings from processing of gold-bearing ores. Sample numbers correspond to those in fig. 2.

Анализ морфометрических данных показал, что на субстратах с нейтральной средой произошло

удлинение главного корня и увеличилась высота ростков (рис. 5 / fig. 5).



**Рис. 5.** Средние значения максимальной длины корня (К) и ростка (Р) овса посевного (в мм), выращенного на субстрате отходов переработки золотосодержащих руд

**Fig. 5.** Average values of the maximum root (K) and sprout length (P) (mm) of oats grown on a substrate of waste from processing gold-bearing ores

Следовательно, проростки овса посевного позитивно отреагировали на нейтральную кислотность в среде обитания увеличением биомассы корней и ростков, чему, вероятно, способствовало образование придаточных корней.

Анализ химического состава сухой массы корней и

ростков недельных проростков овса посевного позволил выявить транслокацию в них металлов и неметаллов из техногенного субстрата (табл. 2 / tabl. 2).

Таблица 2

Химический состав сухой массы проростков овса, выращенных на техногенном субстрате, мг/кг\*

Table 2

The chemical composition of the dry mass of oat seedlings grown on a technogenic substrate, ppm\*

| Показатель // Indicator | Кислые участки хвостохранилищ // Acid material of tailings |                |                        |                | Нейтральные участки хвостохранилищ // Neutral material of tailings dumps |                |                        |                | Слабокислый участок Берикольского отвала // Semi-acid material of the Berikul dump |                |
|-------------------------|--|----------------|------------------------|----------------|--|----------------|------------------------|----------------|--|----------------|
|                         | Талмовские пески // Thalmov Sands                          |                | Дюков лог // Dukov log |                | Талмовские пески // Thalmov Sands  |                | Дюков лог // Dukov log |                | Ростки // Sprouts  | Корни // Roots |
|                         | Ростки // Sprouts  | Корни // Roots | Ростки // Sprouts      | Корни // Roots | Ростки // Sprouts  | Корни // Roots | Ростки // Sprouts      | Корни // Roots |  |                |
| SO <sub>4</sub>         | 33500  | <b>59000</b>   | 37000                  | <b>52000</b>   | 21000  | <b>57000</b>   | 14500                  | <b>95600</b>   | 16300  | <b>19000</b>   |
| K                       | <b>17000</b>   | 10590          | <b>20000</b>           | 13000          | <b>22700</b>   | 5240           | <b>17500</b>           | 9400           | <b>15800</b>   | 4400           |
| Ca                      | 3100   | <b>9800</b>    | 2500                   | <b>6100</b>    | 2700   | <b>14000</b>   | 2800                   | <b>4400</b>    | 610  | <b>840</b>     |
| Na                      | 190  | <b>770</b>     | 280                    | <b>1020</b>    | 180  | <b>610</b>     | 210                    | <b>910</b>     | 410  | <b>570</b>     |
| Mg                      | 3268   | <b>4280</b>    | 3532                   | <b>4429</b>    | 3389   | <b>7306</b>    | 1997                   | <b>2435</b>    | 1800   | 1410           |
| Si                      | 280  | <b>420</b>     | 170                    | <b>240</b>     | 270  | <b>710</b>     | 220                    | <b>880</b>     | 390  | <b>580</b>     |
| Al                      | 28   | <b>170</b>     | 33                     | <b>150</b>     | 47   | <b>710</b>     | 34                     | <b>620</b>     | 78   | <b>200</b>     |
| P                       | <b>7800</b>  | 6400           | <b>7300</b>            | 6900           | <b>8000</b>  | 2900           | <b>8200</b>            | 4100           | <b>8100</b>  | 6300           |
| Mn                      | 270  | <b>410</b>     | 170                    | <b>200</b>     | 120  | <b>980</b>     | 67                     | <b>220</b>     | <b>59</b>  | 46             |
| Fe                      | 200  | <b>1700</b>    | 500                    | <b>5100</b>    | 560  | <b>15000</b>   | 330                    | <b>3900</b>    | 1400   | <b>4200</b>    |
| Co                      | 2,7  | <b>7,4</b>     | 1,2                    | <b>24</b>      | 0,2  | <b>4,2</b>     | 0,22                   | <b>3,1</b>     | 2,0  | <b>3,0</b>     |
| Ni                      | <b>68</b>  | 10             | <b>6,8</b>             | 6,6            | 4,2  | <b>9,6</b>     | 4,1                    | <b>8,5</b>     | <b>7,1</b>   | 6,7            |
| Cu                      | 20   | <b>130</b>     | 11                     | <b>19</b>      | 30   | <b>310</b>     | 19                     | <b>160</b>     | 17   | <b>29</b>      |
| Zn                      | <b>1000</b>  | 330            | 120                    | <b>310</b>     | 300  | <b>5000</b>    | 200                    | <b>2900</b>    | <b>84</b>  | 81             |
| As                      | 1,2  | <b>11</b>      | 6,5                    | <b>18</b>      | 5,0  | <b>88</b>      | 8,1                    | <b>20</b>      | 75   | <b>240</b>     |
| Mo                      | <b>2,4</b>   | 2,2            | <b>2,5</b>             | 1,8            | 2,7  | <b>8,0</b>     | 3,8                    | <b>5,7</b>     | 2,2  | <b>2,5</b>     |
| Cd                      | 4,0  | <b>9,9</b>     | 0,44                   | <b>1,1</b>     | 5,4  | <b>36</b>      | 0,88                   | <b>12</b>      | 0,39   | <b>0,66</b>    |
| Pb                      | 6,1  | <b>44</b>      | 3,5                    | <b>29</b>      | 59   | <b>1600</b>    | 51                     | <b>940</b>     | 1,9  | <b>2,2</b>     |
| U                       | 0,01   | <b>0,29</b>    | 0,015                  | <b>0,24</b>    | 0,045  | <b>1,1</b>     | 0,023                  | <b>0,41</b>    | 0,012  | <b>0,052</b>   |
| Ag                      | 0,077  | <b>0,44</b>    | 0,038                  | <b>0,092</b>   | 0,59   | <b>10</b>      | 0,43                   | <b>9,1</b>     | 0,21   | <b>0,32</b>    |
| Au                      | 0,003  | <b>0,008</b>   | 0,0026                 | <b>0,012</b>   | 0,0036   | <b>0,22</b>    | 0,06                   | <b>0,081</b>   | 0,014  | 0,01           |

\* **Примечание:** жирным шрифтом выделены значения преимущественного накопления элементов в проростках\* **Note:** the maximum values are highlighted in bold in the seedlings

В корни и ростки транспортируются металлы и металлоиды, при этом многие из них не являются жизненно необходимыми для овса, как и для большинства растений. Спектр тяжёлых металлов широкий, их содержание высокое. Выявилась тенденция преимущественного накопления элементов в ростках: K, P, Ni, и в корнях: Na, Ca, Mg, Si, Al, Mn, Fe, Co, Cd, Pb, As, а также Ag и Au.

В растениях, выращенных в мелкозёме как на фоне кислой среды, так и нейтральной обнаружено высокое содержание Zn, Mo, Ni, P в ростках. Известно, что цинк наиболее доступен растениям в диапазоне кислотности pH - 5-8 ед., находясь в адсорбированном виде. При увеличении кислотности среды адсорбция цинка ослабляется, что подтверждается нашими данными. В растворимость цинк-содержащих комплексов большой вклад вносят органические соединения. Поступление в ростки других металлов обязано скорее всего безбарьерному транзиту и их накоплению (в плазмолемме и в вакуолях).

Повышенные значения металлов внутри корня, вероятно, обусловлены разными механизмами: продуцированием в прикорневой зоне микроорганизмами сидерофоров, способствующих транзиту, а также присутствием пептидов (фитохелатинов) и низкомолекулярных полипептидов (металлотиионеинов), которые являются «органическими лигандами» [29], образующими с металлами комплексную соль (хелат), в которой закреплены по всем валентностям. Однако синтез белковых хелаторов энергозависим. Поэтому снижение энергии, расходуемой на окислительные процессы в присутствии тяжёлых металлов, может в определённых ситуациях негативно отразиться на продуцировании глутатиона и цистеина (предшественника глутатиона) вследствие ослабления активности фермента – O-ацетил-серинлиазы, которая участвует в образовании цистеина. Снижение его количества может ослабить образование защитных белковых соединений, которые участвуют в адаптации растений к тяжёлым металлам. Возможно, приток азота микробного происхождения

способствует образованию в проростках овса аминокислот, нуклеиновых кислот, хлорофилла, что благоприятствует синтезу защитных белков.

#### Заключение

Исследованные отходы переработки золотосодержащих руд, складированные в хвостохранилища и насыпные отвалы, по истечению многолетнего нахождения на дневной поверхности, вовлечены в процессы первичного почвообразования. В настоящее время техногенные массивы характеризуются разной степенью окисленности, отличаются по кислотности (от ультракислых до слабощелочных значений), составу и содержанию химических элементов. При этом они жизнепригодны для овса посевного, фото- и гетеротрофных азотфиксирующих бактерий – азотобактера и цианобактерий, которые эволюционно приспособлены к присутствию тяжёлых металлов и металлоидов в среде обитания.

Мелкозём участков хвостохранилищ с нейтральной кислотностью оказался наиболее пригодным для поселенцев по сравнению с таковым на участках с более низкими значениями pH. Выживание и размножение в мелкозёме азотфиксирующих микроорганизмов обеспечивает пополнение ими биогенного азота, необходимого проросткам. Жизнедеятельности кальцефильного азотобактера и цианобактерий способствует вторичное образование гипса в среде обитания. Не исключено, что в периоды пересыхания техногенного субстрата, некоторые виды цианобактерий, пребывающие внутри сульфата кальция, используют не жидкую воду, а структурную (содержание которой достигает 20,8% в составе минерала), переводя его в ангидрит [30]. Наибольшее подавление роста азотобактера наблюдается на сильноокисленных участках насыпных отвалов, которые можно отнести по степени угнетения бактерии к чрезвычайно и высоко опасным.

Транслокация тяжёлых металлов и неметаллов из техногенных субстратов внутрь корней и ростков овса посевного обнаружена уже в недельных проростках, выращенных на средах с разной кислотностью. Депонирование большинства тяжёлых металлов в корнях проростков овса посевного можно рассматривать как факт комплексообразования тяжёлых металлов хелатного типа, что способствует снижению токсичности. Присутствие слизистых азотфиксирующих особей цианобактерий и азотобактера способствует сорбции металлов и переводу их в хелатное состояние наряду с экзометаболитами овса посевного. Максимальное содержание Au и Ag в корнях проростков способствует сохранности их в пределах мочковатой корневой системы. Полученная информация может быть использована при характеристике первичного почвообразования и современных механизмов биогенного концентрирования металлов в условиях техногенеза, учтена при обосновании и разработке природоподобных технологий экологически безопасной консервации хвостохранилищ.

#### Сведения об авторском вкладе

В.С. Артамонова – постановка задачи исследования, формулировка идеи статьи, работа с иностранными источниками, написание и научное редактирование статьи;

С.Б. Бортникова – определение химического состава в проростках, анализ химических данных, редактирование текста.

#### Contribution of the authors

Valentina S. Artamonova – formulation of the research task, formulation of the idea of the article, work with foreign sources, writing and scientific editing of the article;

Svetlana B. Bortnikova – determination of chemical composition in seedlings, analysis of chemical data, text editing.

#### Список источников

1. Артамонова В.С. Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2002. 225 с.

2. Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Хусаинова А.Ш. Бактерии и водоросли – участники первичного почвообразования на отходах переработки полиметаллических руд // Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвящённой 80-летию д.б.н., проф. Б.Б. Намсараева, 100-летию Республики Бурятия, 300-летию Российской академии наук. Улан-Удэ – Байкальск, 3-7 июля 2023 г. /отв. ред. Д.Д. Бархутова, О.П. Дагурова, Т.Г. Банзаракцаева. Новосибирск: СО РАН, 2023. С.10-11.

3. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. 169 с.

4. Бортников Н.С., Дистлер В.В., Викентьев И.В., Гамянин Г.Н., Григорьева А.В., Гроховская Т.Л., Служеникин С.Ф., Тагиров Б.Р. Формы нахождения благородных металлов в рудах комплексных месторождений: методология изучения, количественные характеристики, технологическое значение // Проблемы минералогии России. Москва: РАН. Отделение наук о Земле. 2012. С. 365-384.

5. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М. Стандартинформ, 2011. 31 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/12883?ysclid=ltvbnd0c41691944050> (дата обращения: 17.03.2024).

6. ГОСТ Р 57446-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64416/> (дата обращения: 29.03.2023).

7. ГОСТ Р 59060-2020. Охрана окружающей среды. Классификация нарушенных земель в целях рекультивации. М.: Стандартинформ, 2020. 19 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/566283613> (дата обращения: 15.06. 2021).

8. ГОСТ Р ИСО 18763-2019. Качество почвы. Определение токсического воздействия загрязняющих веществ на всхожесть и рост на ранних стадиях высших растений. М.: Стандартинформ, 2021. 19 с. URL: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=233567> (дата обращения: 10.10.2021).

9. Ерёмин Д.И., Савельева Ю.В. К вопросу о сортовой устойчивости овса к токсическому действию

алюминия на ранних этапах онтогенеза // Вестник Курганской ГСХА. 2023. № 2 (46). С. 25–33.

10. Зенова Г.М., Степанов А.Л., Лихачёва А.А., Манучарова Н.А. Практикум по микробиологии почв. М.: МГУ, 2002. 120 с.

11. Михайлов А.Г., Харитонова М.Ю., Вахлаев И.И., Свиридова М.Л. Мобильность цветных и благородных металлов в хвостах обогащения // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С.1-9.

12. Петухов А.С., Кремлева Т.А., Петухова Г.А., Хридохин Н.А. Влияние тяжёлых металлов на биохимические показатели овса посевного (*AVENA SATIVA*) // Российский журнал прикладной экологии. Вып.3. 2022. С.63-71.

13. Радциг М. А., Кокишарова О. А., Надточенко В. А., Хмель И. А. Получение наночастиц золота методом биогенеза с использованием бактерий // Микробиология. 2016. Т.85. №1. С. 42-49.

14. Рассказов И.Ю., Александрова Т.Н., Литвинцев В.С. Проблемы извлечения тонкодисперсного золота из песков техногенных россыпей и некоторые пути их решения // Проблемы освоения техногенного комплекса месторождений золота: сборник трудов межрегиональной конференции. Магадан, 15-17 июля 2010 /редкол.: Дудов Н.И. и др. Магадан: Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило Дальневосточного отделения Российской академии наук (СВКНИИ ДВО РАН) НИИ ДВО РАН. 2010. С.167-169.

15. Рихванов Л.П., Абросимова Н.А., Барановская Н.В., Белан Л.Н., Большунова Т.С., Бортникова С.Б., Горбатюк Е.А., Густайтис М.А., Еделев А.В., Межибор А.М., Мякая И.Н., Соктоев Б.Р., Юсупов Д.В., Жмодик С.М., Ишук Н.В., Кириченко И.С., Наркович Д.В., Лазарева Е.В., Оленченко В.В., Саева О.П., Сарыг-оол Ю., Усманова Т.В., Юркевич Н.В. Биогеохимический мониторинг в районах хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом микробиологических факторов трансформации минеральных компонентов. Новосибирск: изд-во СО РАН, 2017. 437 с.

16. Розанов А.Ю. Ископаемые бактерии и новый взгляд на процессы осадкообразования // Соросовский ж., 1999. № 10. С. 63-67.

17. Савельева Ю.В., Ахтямова А.А. К вопросу о реакции овса на кислотно-щелочные условия // Эпоха науки. № 35. 2023. С. 24-28.

18. Соколов А.Е., Черников В.А. Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Книга 1. Атлас распределения тяжёлых металлов в объектах окружающей среды. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН. 1999. 164 с.

19. Солохина И.Ю. Выделение авеноцина из овса посевного (*Avena sativa* L.) и изучение его физиолого-биохимических аспектов действия: Автореф. ...дис. канд. биол. наук: 03.01.05 - физиология и биохимия растений. Воронеж, 2013. 24 с.

20. Сэги Й. Методы почвенной микробиологии. М.: Колос, 1983. 296 с.

21. Теннер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева, Г.И. Практикум по микробиологии. М.: Дрофа, 2004. 256 с.

22. Фёдоров С.А., Амдур А.М., Малышев А.Н., Каримова П.Ф. Обзор техногенных и вторичных золото-

содержащих отходов и способы извлечения из них золота // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11-1. С. 346-365.

23. Хусаинова А.Ш., Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Волынкин С.С., Калинин Ю.А. Вторичные минералы Fe, Pb, Cu в сульфидсодержащем хвостохранилище: последовательность образования, электрохимические реакции и физико-химическая модель (Талмовские Пески, Салаир, Россия) // Russian J. Earch. Sci. 2023. Т.23. 22 с.].

24. Шавекина А.Ш., Бортникова С.Б., Волынкин С.С., Юркевич Н.В., Бондаренко В.П., Гаськова О.Л., Артамонова В.С. Типоморфные характеристики барита из полиметаллических хвостохранилищ Салаирского Кряжа // Литогенез и минерогения осадочных комплексов докембрия и фанерозоя Евразии: материалы X Международного совещания по литологии. Воронеж, ВГУ, 18–23 сентября 2023 г /ред. Ю.А. Гаврилов, А.Д. Савко, отв. за выпуск Крайнов А.В., Бондаренко С.В. Воронеж, 2023. С. 487-490.

25. Шавекина А.Ш., Юркевич Н.В., Гаськова О.Л., Артамонова В.С., Бортникова С.Б., Волынкин С.С. Условия образования аутигенного барита в полиметаллических хвостохранилищах // Новое в познании процессов рудообразования: Двенадцатая Российская молодёжная научно-практическая Школа. Москва, 27 ноября – 01 декабря 2023 г./ редкол. Петров В.А., Ковальчук Е.В., Комаров В.Б., Комарова М.М., Устинов С.А., Усачёва А.А. М.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 246-249.

26. Aquilanti L., Favilli F., Clementi F. Comparison of different strategies for isolation and preliminary identification of *Azotobacter* from soil samples // Soil Biology and Biochemistry. 2004. Vol. 36. P. 1475-1483.

27. Artamonova V.S., Kosiniva L. Ju. Gene pool of nitrogen-fixing microorganisms in mountain soils of Siberia // Man and mountain ' 94. Protection and development of mountain environment Proceedings. Ponte di Legno. Italy. 1994. P.547-561.

28. Borase H.P, Patil C.D, Suryawanshi R.K, Koli S.H, Mohite B.V, Benelli A. and Patil S. Mechanistic approach for fabrication of gold nanoparticles by *Nitzschia* diatom and their antibacterial activity // Bioprocess Biosyst. Eng. 2017. Vol 40(10). P. 1437-1446.

29. Burckhard S.R., Schwab A.P., Bankks V.K. The effects of organic acids on the leaching of heavy metals from tailings // J. Hazardous materials. 1995. Vol. 41. P.135-145.

30. Huang W., Ertekin E., Wang T., Cruz L., Dailey M., Di Ruggiero J., & Kisailus D. Mechanism of water extraction from gypsum rock by desert colonizing microorganisms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. 117(20). P.10681–10687.

## References

1. Artamonova, V., 2002. Mikrobiologicheskie osobennosti antropogenno preobrasovannyh pochv Zapadnoi Sibiri [Microbiological features of anthropogenically transformed soils of Western Siberia]. Novosibirsk, Publishing house of SB RAS. 225 p. (In Russian)

2. Artamonova, V., Bortnikova, S., and Khusainova A., 2023. Bacteria and algae – participants in primary soil formation on waste from polymetallic ore processing. In: Barkhutova D.D., Dagurova O.P., Banzaraktsaeva T.G.

- (ed). Ecology and geochemical activity of microorganisms in extreme habitats: materials of the III All-Russian Conference with international participation dedicated to the 80th anniversary of Doctor of Biological Sciences, Professor B.B. Namsaraev, the 100th anniversary of the Republic of Buryatia, the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences. Ulan-Ude – Baikalsk, July 3-7, 2023. Novosibirsk, SB RAS, pp. 10-11. (In Russian)
3. Bortnikova, S., Gaskova, O. and Bessonova, E., 2006. Geohimija tehnogennyh system [Geochemistry of technogenic systems]. Novosibirsk: Academic publishing house "Geo", 169 p. (In Russian)
  4. Bortnikov, N., Distler, V., Vikentiev, I., Gamyarin, G., Grigorieva, A., Grokhovskaya, T., Sluzhenikin, S. and Tagirov, B., 2012. Formy nahozhdeniya blagorodnyh metallov v rudah kompleksnyh mestorochlenii: metodologiya izucheniya, kolichestvennyye karakteristiki, tehnologicheskoe znachenie [Forms of finding precious metals in ores of complex deposits: methodology of study, quantitative characteristics, technological significance]. *Problems of mineralogy of Russia*. Department of Earth Sciences Moscow, RAS, pp. 365-384. (In Russian)
  5. GOST 12038-84. Semena sel'skohozyaistvennykh kul'tur. Metody opredeleniya vshozhesti. 1984. [Seeds of agricultural crops. Methods for determining germination]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 31 p. Available from: <https://internet-law.ru/gosts/gost/12883?ysclid=ltvbn0c4l691944050> [Accessed 17th Marth 2024].
  6. GOST R 57446-2017. Nailuchshie dostupnye tehnologii. Rekul'tivaciya narushennykh zemel' i zemel'nyh uchastkov. Vosstanovlenie biologicheskogo raznoobraziya, 2019. [The best available technologies. Reclamation of disturbed land plots. Restoration of biological diversity]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 23 p. Available from: <https://internet-law.ru/gosts/gost/64416/> [Accessed 29th Marth 2023].
  7. GOST R 59060-2020. Ohrana okruzhayushchei sredi. Klassifikaciya narushennykh zemel' v celyah rekul'tivacii, 2020. [Environmental protection. Classification of disturbed lands for reclamation]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 19 p. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/566283613> [Accessed 15th June 2021].
  8. GOST R ISO 18763-2019. Kachestvo pochvy. Opredelenie toksicheskogo vozdeystviya zagryaznykh veschestv na vshozhest' i rost na rannih stadiyah razvitiya visshih rastenii, 2019 [The quality of the soil. Determination of the toxic effects of pollutants on germination and growth in the early stages of higher plants]. *Ohrana prirody*. Moscow, Standartinform, 19 p. Available from: <https://protect.gost.ru/default.aspx/v.aspx?control=7&id=233567> [Accessed 10th October 2021].
  9. Eremin, D. and Saveljeva Ju., 2023. On the issue of varietal resistance of oats to the toxic effect of aluminum in the early stages of ontogenesis. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*, 2 (46), pp. 25-33. (In Russian)
  10. Zenova, G., Stepanov, A., Likhacheva, A. and Manucharova, N., 2002. *Praktikum po biologii pochv* [Workshop on soil biology]. Moscow, MGU Publ, 120 p. (In Russian)
  11. Mihailov, A., Haritonova, M., Vashlaev, I. and Sviridova, M., 2014. Mobility of non-ferrous and precious metals in enrichment tailings. *Modern problems of science and education*, 6, pp. 1-9. (In Russian)
  12. Petuhov, A., Kremleva, T., Petuhova, G. and Hritohin, N., 2022. The influence of heavy metals on the biochemical parameters of oats (*Avena sativa*). *Russian Journal of Applied Ecology*, 3, pp. 63-71. (In Russian)
  13. Radzig, M., Koksharova, O., Nadochenko, V. and Khmel, I., 2016. Obtaining gold nanoparticles by biogenesis using bacteria, *Microbiology*, 85(1), pp. 42-49. (In Russian)
  14. Rasskazov, I., Alexandrova, T. and Litvintsev, V., 2010. *Problems of extraction of fine gold from sands of technogenic placers and some ways of their solution*. Dudov N. et al.(ed). *Problems of development of the technogenic complex of gold deposits: proceedings of the interregional conference: 15-17 July 2010, Magadan*. Magadan: N.A. Shilo Northeastern Integrated Research Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (SVKNII FEB RAS, pp.167-169. (In Russian)
  15. Rikhvanov, L., Abrosimova N., Baranovskaya N., Belan L., Bolshunova T., Bortnikova S., Gorbatyuk E., Gustaitis M., Edelev A., Mezhibor A., Soft I., Soktoev B., Yusupov D., Zhmodik S., Ishchuk N., Kirichenko I., Narkovich D., Lazareva E., Olenchenko V., Saeva O., Saryg-ool Yu., Usmanova T. and Yurkevich N., 2017. *Biogeohimicheskii monitoring v raionah hvostohranilish gornodobyvayuschih predpriyatii s uchetom mikrobiologicheskikh faktorov transformacii mineral'nykh kompleksov* [Biogeochemical monitoring in the areas of tailings dumps of mining enterprises taking into account microbiological factors of transformation of mineral components]. Novosibirsk: Publishing house of the SB RAS, 437 p. (In Russian)
  16. Rozanov, A., 1999. Fossil bacteria and a new look at the processes of sedimentation. *Sorosovskiy J.*, 10, pp. 63-67. (In Russian)
  17. Savelyeva, Yu. and Akhtyamova, A., 2023. On the reaction of oats to acid-base conditions. *The age of science*, 35, pp. 24-28. (In Russian)
  18. Sokolov, A. and Chernikov, V., 1999. *Ekologicheskaya bezopasnost' i ustoichivoe razvitie. Kniga 1. Atlas raspredeleniya tyachelykh metallov v obyektah okruzhayusheq sredi*. [Environmental safety and sustainable development. Book 1. Atlas of the distribution of heavy metals in environmental objects. Pushchino: ONTI PNC RAS. 164 p. (In Russian)
  19. Solokhina, I., 2013. *Vydelenie avenocina iz ovsy posevnogo (Avena sativa L.) i izuchenie ego fiziologo-biokhimicheskikh aspektov deystviya* [Isolation of avenocin from oats (*Avena sativa* L.) and the study of its physiological and biochemical aspects of action]. Doctor's Dissertation Abstract of Sciences in Physiology and biochemistry of plants. Voronezh, 24 p. (In Russian)
  20. Segi, Y., 1983. *Metody pochvennoj mikrobiologii* [Methods of soil microbiology]. Moscow, Kolos, 296 p. (In Russian)
  21. Tepper, E., Shilnikova, V. and Pereverzeva, G., 2004. *Praktikum po mikrobiologii*. [Practicum on microbiology]. Moscow, *Bustard Publ.*, 256 p. (In Russian)
  22. Fedorov, S., Amdur, A., Malyshev, A. and Karimova, P., 2021. Overview of technogenic and secondary gold-containing wastes and methods of extracting gold from them. *Mining information and analytical bulletin*, 11-1, pp. 346-365. (In Russian)

23. Khusainova, A., Bortnikova, S., Gaskova, O., Volynkin, S. and Kalinin, Yu., 2023. Secondary minerals Fe, Pb, Cu in a sulfide-containing tailings reservoir: sequence of formation, electrochemical reactions and physico-chemical model (Talmov Sands, Salair, Russia). *Russian J. Earth. Sci.*, 23, 22 p. (In Russian)
24. Shavekina, A., Bortnikova, S., Volynkin, S., Yurkevich, N., Bondarenko, V., Gaskova, O. and Artamonova, V., 2023. Typomorphic characteristics of barite from polymetallic tailings dumps of the Salair Ridge. Gavrilov, Yu., Savko, A. (ed). Lithogenesis and minerageny of sedimentary complexes of Precambrian and Phanerozoic Eurasia: Proceedings of the X International Meeting on Lithology, 18-23 September, Voronezh. Voronezh: VSU, pp. 487-490. (In Russian)
25. Shavekina, A., Yurkevich, N., Gaskova, O., Artamonova, V., Bortnikova, S. and Volynkin, S., 2023. Conditions for the formation of autigenic barite in polymetallic tailings ponds. Petrov, V., Kovalchuk, E., Komarov, V., Komarova, M., Ustinov, S. and Usacheva, A. (ed). New in the knowledge of ore formation processes: The Twelfth Russian Youth Scientific and Practical School, 27 November – 01 December, 2023, Moscow. Moscow, *IGEM RAS*, pp. 246-249. (In Russian)
26. Aquilanti, L., Favilli, F. and Clementi, F., 2004. Comparison of different strategies for isolation and preliminary identification of *Azotobacter* from soil samples. *Soil Biology and Biochemistry*. 36, pp. 1475-1483.
27. Artamonova, V. and Kosiniva, L., 1994. Gene pool of nitrogen-fixing microorganisms in mountain soils of Siberia // Man and mountain '94. Protection and development of mountain environment Proceedings. Ponte di Legno. Italy, pp.547-561.
28. Borase, H., Patil, C., Suryawanshi, R., Koli S., Mohite, B., Benelli, A. and Patil, S., 2017. Mechanistic approach for fabrication of gold nanoparticles by *Nitzschia* diatom and their antibacterial activity *Bioprocess Biosyst. Eng.* 40(10), pp.1437-1446.
29. Burckhard, S., Schwab, A. and Banks, V., 1995. The effects of organic acids on the leaching of heavy metals from tailings. *J. Hazardous materials*. 41, pp.135-145.
30. Huang, W., Ertekin, E., Wang, T., Cruz, L., Dailley, M., Ruggiero, J., and Kisailus, D., 2020. Mechanism of water extraction from gypsum rock by desert colonizing microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117(20), pp.1068-1075.

Статья поступила в редакцию 08.04.2024; одобрена после рецензирования 15.04.2024; принята к публикации 18.04.2024.

The article was submitted 08.04.2024; approved after reviewing 15.04.2024; accepted for publication 18.04.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья

УДК 556.5:547.211

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50>

### Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах

Дмитрий Николаевич Гарькуша<sup>1</sup>, Юрий Александрович Фёдоров<sup>2</sup>, Алексей Евгеньевич Косолапов<sup>3</sup>, Елена Валентиновна Усова<sup>4</sup>, Евгения Леонидовна Анпилова<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1, 2</sup> Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

<sup>1</sup> [gardim@sfedu.ru](mailto:gardim@sfedu.ru)

<sup>2</sup> [fedorov@sfedu.ru](mailto:fedorov@sfedu.ru)

<sup>3</sup> [akosol@mail.ru](mailto:akosol@mail.ru)

<sup>4</sup> [chimanalit@inbox.ru](mailto:chimanalit@inbox.ru)

<sup>5</sup> [anpilova.jane@gmail.com](mailto:anpilova.jane@gmail.com)

**Аннотация.** В статье проанализированы и обобщены результаты опубликованных работ, направленных на установление влияния различных природных и антропогенных факторов и процессов на образование, концентрацию и окисление метана в воде и донных отложениях, а также его эмиссию в системе «донные отложения – вода – атмосфера». Вариативность концентраций и удельных потоков метана в водохранилищах связана с изменчивостью гидрологических и морфологических особенностей, обуславливающих интенсивность продукционно-деструкционных процессов, характер механической миграции органического и минерального вещества и распределение литологических типов донных отложений на разных участках водоема. Значительное воздействие на формирование концентраций и потоков метана оказывают ветровая активность и поступление соединений углерода, азота и фосфора с поверхности водосбора (в том числе от антропогенных источников) и в результате разложения органического вещества почв и растительности, затопленных при наполнении водохранилища. Показано, что при оценке эмиссии метана в атмосферу для каждого водохранилища необходимо учитывать своеобразие комбинированного влияния природных и антропогенных факторов и процессов.

**Ключевые слова:** парниковые газы, вода, донные отложения, концентрация, окисление, диффузия, пузырьковый перенос, эмиссия, природные и антропогенные факторы

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках мероприятий по информационному обеспечению в области водных ресурсов в соответствии с соглашением с Федеральным агентством водных ресурсов № 052-02-2023-010 от 13.01.2023 г.

**Для цитирования:** Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Косолапов А.Е., Усова Е.В., Анпилова Е.Л. Анализ факторов формирования концентраций и эмиссионных потоков метана в водохранилищах // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 37-50. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50>

## SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

УДК 556.5:547.211

### The factors of methane concentrations and emission fluxes formation analysis in water reservoirs

Dmitry N. Gar'kusha<sup>1</sup>, Yury A. Fedorov<sup>2</sup>, Alexey E. Kosolapov<sup>3</sup>, Elena V. Usova<sup>4</sup>, Evgenia L. Anpilova<sup>5</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Russian Scientific Research Institute for Integrated Use and Protection of Water Resources, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1, 2</sup> Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

<sup>1</sup> [gardim@sfedu.ru](mailto:gardim@sfedu.ru)

<sup>2</sup> [fedorov@sfedu.ru](mailto:fedorov@sfedu.ru)

<sup>3</sup> [akosol@mail.ru](mailto:akosol@mail.ru)

<sup>4</sup> [chimanalit@inbox.ru](mailto:chimanalit@inbox.ru)

<sup>5</sup> [anpilova.jane@gmail.com](mailto:anpilova.jane@gmail.com)

**Abstract.** The article analyzes and summarizes the results of published works aimed at establishing the influence of

various natural and anthropogenic factors and processes on the formation, concentration and oxidation of methane in water and sediments, as well as its emission in the "sediments – water – atmosphere" system. It has been established that the variability of concentrations and specific fluxes of methane in reservoirs is associated with the variability of hydrological and morphological features that determine the intensity of production and destruction processes, the nature of mechanical migration of organic and mineral matter and the distribution of lithological types of bottom sediments in different parts of the reservoir. Wind activity and the intake of carbon, nitrogen and phosphorus compounds from the surface of the catchment area (including from anthropogenic sources) and as a result of decomposition of organic matter of soils and vegetation flooded during reservoir filling have a significant impact on the formation of methane concentrations and fluxes. It is shown that when assessing methane emissions into the atmosphere for each reservoir, it is necessary to take into account the peculiarity of the combined influence of natural and anthropogenic factors and processes.

**Keywords:** greenhouse gases, water, sediments, concentration, oxidation, diffusion, bubble transfer, emission, natural and anthropogenic factors

**Funding:** The study was carried out within the framework of information support measures in the field of water resources in accordance with the agreement with the Federal Agency for Water Resources No. 052-02-2023-010 dated 01/13/2023.

**For citation:** Gar'kusha, D., Fedorov, Y., Kosolapov, A., Usova, E. and Anpilova, E., 2024. The factors of methane concentrations and emission fluxes formation analysis in water reservoirs. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 10(1). pp. 37-50. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-37-50> (in Russian)

### Введение

Глобальное изменение климата, связанное с увеличением концентраций в атмосфере Земли климатически активных (парниковых) газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др.) является актуальной экологической проблемой. Оно обуславливает повышение температуры воздуха в тропосфере, таяние вечной мерзлоты, повышение уровня Мирового океана, увеличение частоты и интенсивности гидрометеорологических стихийных бедствий [46].

Если межрезервуарный обмен диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) между различными экосистемами исследован более или менее хорошо, то метан ( $\text{CH}_4$ ) и закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) в этом отношении изучены слабо [38]. Метан является следующим по значимости после  $\text{CO}_2$  парниковым газом, однако его «парниковый потенциал» в расчете на 100 лет в 21 раза сильнее, чем у  $\text{CO}_2$  [46].

Общая эмиссия метана в атмосферу оценивается в 500–600 Тг/год, причем среднегодовые скорости его поступления и выведения из окружающей среды могут сильно варьировать [66]. Вклад метана в общий парниковый эффект по разным оценкам составляет от 16% [32] до 18–19% [34], при этом скорость увеличения его содержания в атмосфере в 2–4 раза выше, по сравнению с диоксидом углерода. Так, современная (измеренная в декабре 2023 года) средняя концентрация метана в атмосфере составила 1932,23 ppb [52], что в 2,68 раза выше, чем в доиндустриальные времена – 720 ppb.

Большая часть атмосферного метана имеет бактериальное (биогенное) происхождение и полностью контролируется его потоками с земной поверхности [34]. Около 40% метана поступает в атмосферу от природных источников, например, высокоэвтрофных ветлендов (болот), тропических влажных лесов, термитов, и около 60% – из антропогенных источников (например, свалок промышленных и бытовых отходов, рисовых полей, при неполном сжигании биомассы, выращивании крупного рогатого скота, добычи и эксплуатации ископаемого топлива) [60].

В последние десятилетия особое внимание ученых направлено на изучение водохранилищ, как антропогенного источника метана [3; 13; 14; 16; 44; 47]. Это связано с тем, что водохранилища, являясь крупными резервуарами – накопителями автохтонного и аллохтонного органического вещества, обладают высоким потенциалом к образованию метана в донных отложениях и его эмиссии в атмосферу.

В первые годы после заполнения чаши водохранилища затопленные почвы и растительность представляют собой значимый внутренний источник органических веществ и биогенных элементов, поддерживающих высокий уровень продуктивности экосистемы [15]. Для этого периода характерна особенно высокая бактериальная активность, способствующая разложению как затопленной, так и продуцированной фитопланктоном органики. Это, даже при относительно слабой стратификации водной толщи, может приводить к истощению в ней запасов кислорода и, как следствие, к интенсивному протеканию анаэробных процессов с образованием метана и его эмиссией в атмосферу. Длительность разложения основной массы затопленного наземного органического вещества после наполнения водохранилища зависит от особенностей почв и растительности, режима заполнения чаши водохранилища, климатических условий и интенсивности водообмена и обычно составляет от одного до десяти лет [15; 39]. В последующее время дно водохранилища покрывается иловыми отложениями, его экосистема стабилизируется, и генерация метана поддерживается за счет разложения аллохтонного органического вещества, поступающего с речными притоками и с поверхности водосбора, а также автохтонной органики, образующейся непосредственно в водохранилище. При этом основное количество метана выделяется в атмосферу спорадически в так называемые «горячие моменты» ("hot moments") [47], во время которых в водохранилищах создаются благоприятные условия для образования и эмиссии газа [29]. На продолжительность формирования таких условий влияют сезонные особенности поступления и

образования органических веществ, стратификации водной толщи и колебания уровня воды [28; 44; 65].

Имеющиеся ориентировочные оценки вклада водохранилищ в глобальную эмиссию метана [26; 36; 41; 53; 54; 64] существенно разнятся (от 2–4 Тг  $\text{CH}_4/\text{год}$  [53] до 95–122 Тг  $\text{CH}_4/\text{год}$  [41]), что обусловлено, как различием в методологиях оценки [14], так и большей, чем в естественных водоемах и водотоках, вариативностью внутригодовых изменений скорости потоков метана. Последнее связано с тем, что водохранилища – это сложные природно-техногенные системы, по характеру водообмена, занимающие промежуточное положение между реками и озерами [15], в которых на природные факторы и процессы, обуславливающие пространственно-временную динамику образования, окисления и эмиссии метана, накладывается значимое влияние искусственного регулирования стока и уровня режима. Это приводит к существенным годовым вариациям площади акватории водохранилища, зон его периодической осушки и затопления, глубин, скорости течений и ветроволновых процессов. В свою очередь, это обуславливает сильную изменчивость интенсивности абразионных процессов в береговой зоне, скорости аккумуляции донных отложений, их гранулометрического и вещественного составов, термического, гидрохимического и гидробиологического режимов водной массы.

В настоящей работе проанализированы и обобщены известные данные о влиянии различных природных и антропогенных факторов на образование, окисление и концентрацию метана в воде и донных отложениях водохранилищ, а также на его эмиссию в системе «донные отложения – вода – атмосфера».

#### **Природные факторы формирования концентраций и эмиссионных потоков метана**

В водохранилищах, как и в других водных экосистемах, метан в основном образуется метанообразующими археями (метаногенами) – специализированной группой прокариотных облигатно-анаэробных микроорганизмов, для которых реакция образования метана является единственным источником энергии, доступным только для них [17; 33]. Согласно классическому механизму образования метана, работа метаногенов начинается только тогда, когда в анаэробных условиях, вследствие разрушения органического вещества гидролитическими, ферментативными и ацетогенными микроорганизмами, появляются следующие субстраты: водород, диоксид углерода, закись углерода, формиат, ацетат, метилированные соединения (такие как метанол, метиламины и диметилсульфид), а также первичные и вторичные спирты [25; 30]. По термодинамическим соображениям образование  $\text{CH}_4$  может служить источником энергии лишь при очень низких значениях окислительно-восстановительного потенциала, близких к разложению воды с образованием водорода. То есть метанообразующие бактерии являются наиболее строгими анаэробами и начинают доминировать численно лишь тогда, когда другие потенциальные источники энергии ( $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ , нитриты, нитраты, сульфаты) исчерпываются. Именно поэтому

максимумы их численности, а также концентраций метана приходится на наиболее восстановленные, как правило, расположенные на некоторой глубине от поверхности, горизонты донных осадков и гидроморфных почв [5; 25]. Обычно концентрация метана в поверхностном 0–5 см слое отложений водных объектов ниже, чем в более глубоких горизонтах и на 1–2 порядка выше, чем в водной толще [25]. В результате неравномерного распределения метана в толще осадков и на границе раздела «дно–вода» возникают и поддерживаются градиенты концентраций, что определяет существование его диффузионного потока как в самих осадках, так и из осадков в придонную воду. Этим и обусловлены характерные для многих водных объектов тесные корреляционные связи между концентрациями метана в этих двух средах [25]. В водоемах и водотоках с незначительными глубинами тесная связь наблюдается также между содержаниями метана в поверхностном и придонном слоях воды, в то время как на глубоководных участках данная связь не прослеживается. Последнее связано с тем, что, диффундируя из донных отложений сквозь мощную толщу воды к поверхности, большая часть растворенного метана окисляется метанотрофными бактериями. При этом скорость метаноокисления зависит от концентрации растворенного кислорода [25], которая связана как с интенсивностью аэрации водной толщи, так и с процессами фотосинтеза и деструкции органического вещества. По данным [27] от 51 до 80%  $\text{CH}_4$ , образующегося в глубоководных отложениях озер, окисляется в толще воды, так и не поступив в атмосферу. Совокупность вышеуказанных факторов обуславливает снижение концентраций  $\text{CH}_4$  по направлению от придонных к поверхностным слоям воды, характерное для многих водных объектов [25]. В то же время, при существовании дополнительных источников поступления метана в водную толщу концентрации метана у поверхности воды или на некоторой глубине от нее могут заметно превышать таковые в придонном горизонте. К таким источникам может относиться: поступление метана в составе вод притоков, сточных вод или его непосредственная генерация в анаэробных микроразделах, образующихся во взвешенных в воде остатках отмерших организмов, а также в пищеварительном тракте и фекальных выделениях (пеллетах) зоопланктона [5].

Молекулярная диффузия метана является не единственным путем его выноса в атмосферу. При интенсивно идущих процессах разложения органического вещества в донных отложениях, возможно перенасыщение газами их порового пространства и, в случае превышения давления газа в отложениях над гидростатическим давлением, может происходить его высачивание (или выброс) из отложений в виде газовых пузырьков и перенос метана в их составе через водную толщу в атмосферу. Считается, что пузырьковый перенос, несмотря на свою эпизодичность, вносит существенно больший вклад в эмиссию  $\text{CH}_4$ , чем молекулярная диффузия [26; 69], поскольку скорость всплывания пузырьков гораздо выше и содержащийся в них  $\text{CH}_4$  не окисляется

напрямую, а только после того, как происходит его растворение в воде. В целом за счет растворения пузырьков газа может наблюдаться локальное повышение концентрации метана в водной массе, окружающей газовый пузырьковый поток [9]. Здесь мы не рассматриваем возможную подводную метановую разгрузку в виде струйных газовыделений, фиксируемых в тектонически ослабленных зонах и областях дегазации над залежами углеводородов, в том числе газогидратов и грязевых вулканов, поскольку это не характерно для водохранилищ.

Если для водной экосистемы характерно сильное развитие водной растительности, имеющей аэренхиму (тростник, рогоз, камыш и т.д.), образующей непрерывное воздушное пространство внутри растения, то пассивный транспорт метана из грунтов корнями через растение в атмосферу может иметь доминирующее значение, поскольку этот путь гораздо быстрее, чем его диффузия и позволяет избежать окисления значительной части метана [1; 5; 37; 60]. Помимо этого, растения выделяют в грунты растворы и легкодоступные органические соединения – корневые экссудаты, которые легко разлагаются, быстро утилизируются и обеспечивают соединениями углерода различные микроорганизмы, тем самым стимулируя их активность и скорость разложения ранее захороненного органического вещества [1; 5; 48]. Следовательно, высокая продуктивность растений в прибрежной зоне, сопровождающаяся их отмиранием и разложением, обеспечивает условия для генерации парниковых газов [37], а наличие аэренхимы у растений, способствует быстрому переносу газов из грунтов в атмосферу [1; 5]. Именно поэтому прибрежная зона часто является «горячей точкой» эмиссии парниковых газов [67]. Особенно интенсивная эмиссия наблюдается в вегетационный период, когда на долю прибрежной зоны относительно небольших водоемов может приходиться более 50% от общего потока  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  [37; 48; 49]. И даже в таком крупном водном объекте, как Азовское море, по оценкам [7], суммарная суточная эмиссия  $\text{CH}_4$  тростниковой формацией побережья в летний период составляла 34,5% от общей его суточной эмиссии открытой водной поверхностью моря, при этом площадь побережья, заросшая тростниковой формацией не превышала 2,5% от площади его акватории.

Таким образом, в водных экосистемах  $\text{CH}_4$ , образовавшийся в донных отложениях, может мигрировать в атмосферу тремя путями: в результате транспорта через растения, пузырькового и диффузионного переноса через водную толщу. Рассмотрим основные факторы и процессы, контролирующие интенсивность эмиссии  $\text{CH}_4$  для каждого из данных путей миграции.

Основными факторами, от которых зависит диффузионный поток метана из водного объекта в атмосферу является его концентрация в поверхностном слое воды, температура, влияющая на скорость молекулярной диффузии газа, и ветровые условия, определяющие интенсивность волнения [5]. При отсутствии волн (штиль) или слабом волнении общий коэффициент газообмена на границе раздела «вода – атмосфера» в основном обусловлен

термической конвекцией, несколько сдерживающей поток метана на границе «вода – атмосфера», вследствие чего в поверхностных водах происходит повышение концентрации метана за счет его переноса из зон генерации. Сильное волнение вызывает динамическое перемешивание водной массы, тем самым способствуя ускорению молекулярно-диффузного механизма газообмена, как за счет увеличения площади поверхности границы «вода – атмосфера», вследствие образования брызг и схлопывания газовых пузырьков, возникающих при обрушении волн, так и за счет активизации транспорта газа от зон генерации к поверхности [20]. При сильном ветре в затронутых волновым перемешиванием слоях воды происходит очень быстрое снижение содержания метана, иногда (при сильных и продолжительных штормах) до концентраций равновесных с атмосферой [5]. Таким образом, после штилевых условий усиление ветра и волнения в первое время приводит к резкому увеличению потока метана в атмосферу, а затем, из-за быстрого снижения его концентрации в воде, поток метана уменьшается до минимальных значений [5]. При этом, наряду со снижением содержания метана, происходит и гомогенизация его концентраций как по площади акватории, так и по вертикали затронутых перемешиванием водных масс.

В водохранилищах, в которых наблюдается зимняя и летняя стратификация вод, возможно ускорение молекулярно-диффузного механизма газообмена, вследствие сезонного «опрокидывания» (перемешивания) вод, как это происходит в озерах [26]. В результате метан, накопившийся в более глубоких горизонтах воды в течение зимы и лета, высвобождается посредством молекулярной диффузии при конвективном перемешивании вод весной после схода льда и осенью после разрушения летней температурной стратификации [63]. По оценкам [57] до 40% годовой эмиссии метана из небольших озер может выделяться во время весеннего перемешивания.

Для пузырькового переноса метана из донных отложений в атмосферу основными факторами будут являться интенсивность выделения со дна пузырьков газа, степень их растворения при подъеме, зависящая от температуры воды, размеров пузырьков, уровня насыщенности метаном водной толщи и глубины, с которой поднимаются пузырьки [58]. С изменением этих факторов будет меняться и доля метана, достигающего атмосферы. Выделение со дна газовых пузырьков, обусловленное превышением давления газа в отложениях над гидростатическим давлением водной толщи, может провоцироваться снижением уровня воды [44] и атмосферного давления [51]. Особенно интенсивные выделения пузырьков газа могут наблюдаться при регулируемом сбросе вод в водохранилищах [44], а также в естественных водоемах и водотоках, в которых сильно выражено влияние сгонно-нагонных и приливно-отливных явлений [5]. Считается [61], что для мелководных выходов пузырьков газа, расположенных на глубинах менее 20 м, почти весь выделяющийся из донных отложений метан достигает границы вода – атмосфера. Для более глубоководных (порядка 50 м) выходов до 50% газовых пузырьков, причем определенного

размера (диаметром  $\sim 10$  мм), достигают поверхностных горизонтов; более мелкие пузырьки быстро растворяются, более крупные разбиваются на мелкие, после чего также растворяются [55]. Подводные струйные выходы газа, расположенные на глубинах свыше 100–300 м, практически не достигают поверхностных слоев воды [61], как и метан, диффузионно выделяющийся в водную толщу из глубоководных отложений.

Для транспорта метана через водные растения в атмосферу основными факторами будут являться концентрация газа в ризосфере (узкий слой почвы, толщиной до 5 мм, прилегающий к корням растения и попадающий под непосредственное действие корневых выделений) и состав растительного сообщества [1; 5]. Согласно [62], такие водные растения как меч-трава (*Cladium jamaicense*), болотница (*Eleocharis interstincta*), манник (*Glyceria striata*), ситник (*Juncus effuses*), кувшинка (*Nymphaea odorata*), кубышка (*Nuphar luteum*), пельтандра (*Peltandra virginica*), понтедерия (*Pontederia cordata*), стрелолист (*Sagittaria graminea* и *S. lancifolia*), рогоз (*Typha latifolia*) способны обеспечить скорость эмиссии метана от 0.1 до 14.8 мг/на растение в сутки. Наибольшей способностью к транспорту метана обладают водные растения, имеющие аэренхиму (тростник, рогоз, камыш и т.д.), в то время как плавающая, не прикрепленная ко дну растительность (например, ряска) очень слабо транспортирует метан [1; 5], поскольку не имеет ни аэренхимы, ни канала связи с донными отложениями – основным источником метана в водных объектах [25].

Концентрация метана в поверхностном слое воды, от которых во многом зависит его диффузионный поток на границе вода – атмосфера, контролируются соотношением приходных и расходных частей (элементов) баланса метана [5]. В приходную часть входят: объем диффузии метана в воду из донных отложений и поднимающихся со дна газовых пузырьков; образование (продукция) метана в водной толще; поступление с поверхности водосбора с речным и подземным стоком, с тальми и дождевыми водами, в составе промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод, а также при абразии берегов. В расходную часть баланса метана входят: объемы его окисления метанотрофами в воде и диффузии из воды в атмосферу.

Концентрация метана в верхних горизонтах донных отложений и ризосфере растений, являющаяся одним из основных факторов, определяющих интенсивность диффузионного и пузырькового потоков на границе дно – вода, а также корневой эмиссии метана растениями, зависит от соотношения следующих элементов баланса метана [5]. В приходную часть баланса входят: объемы непосредственного образования метана (продукция) в верхних горизонтах отложений метаногенными археями и его диффузионного потока из нижележающих слоев. В расходную часть входят: объем аэробного и анаэробного окисления метана в донных отложениях и ризосфере; объем диффузионного стока в нижележающие горизонты; объем суммарной его эмиссии из донных отложений в воду, включающей

диффузию, пузырьковый перенос и транспорт растениями в системе «донные отложения – вода – атмосфера» и «донные отложения (гидроморфные почвы) – ризосфера – растение – атмосфера».

На перечисленные приходные и расходные элементы баланса метана в воде и отложениях оказывают влияние как физико-географические и климатические условия водного бассейна, обуславливающие гидробиологический и гидрологический режимы, и связанные с ними сезонную и суточную динамику физико-химических и биохимических процессов, так и накладывающееся на эти природные факторы антропогенное воздействие [2; 5; 25]. Детальному анализу роли и значимости различных природных и антропогенных факторов в формировании концентраций метана и его потоков в водной толще и донных отложениях водных экосистем посвящена монография [5]. Далее кратко отметим основные результаты, проведенного в ней анализа.

Интенсивность продуцирования метана метаногенными археями в верхних горизонтах отложений и водной толще напрямую зависит от температуры, окислительно-восстановительных условий, количества органических веществ и, прежде всего, лабильных, а также взаимоотношений с другими анаэробными микроорганизмами, во многом обусловленными термодинамикой биогеохимических процессов [5, 25].

Гидрологические условия водного объекта обуславливают характер механической миграции органического и минерального вещества (вынос, транспортировка, аккумуляция), и, как следствие, распределение литологических типов донных отложений на различных участках [5]. Обычно фиксируется рост концентраций метана при переходе от песчаных к алевритово-глинистым илам. Минимальные его концентрации в песчаных осадках связаны с тем, что развитие анаэробных бактерий в них часто бывает подавлено вследствие приуроченности к участкам активного гидродинамического режима, что способствует выносу органических веществ, сохранению относительно высоких концентраций растворенного кислорода у дна и, в результате, предопределяет высокий окислительно-восстановительный потенциал отложений. В тонкозернистых осадках возникает благоприятная физико-химическая обстановка для биогеохимической трансформации аккумулярованного в них органического вещества, с образованием *in situ* метана [5].

Поступление повышенных количеств соединений азота и фосфора с поверхности водосбора и/или в результате разложения органического вещества почв и растительности, затопленных при наполнении водохранилищ, благоприятствует эвтрофикации и интенсивному развитию как высшей водной растительности (макрофитов), так и фитопланктона. Образующийся в водной толще в процессе фотосинтеза кислород способствует окислению метана и, как следствие, снижению его концентраций и потоков, особенно в условиях интенсивного «цветения» воды и пересыщения ее поверхностного слоя кислородом [13]. После отмирания водорослей

часть их минерализуется в водной толще в основном под действием пула аэробных бактерий с образованием  $\text{CO}_2$  и потреблением  $\text{O}_2$ . В эвтрофных озерах и водохранилищах, где наблюдается сильное «цветение» воды, важную роль в формировании содержания метана в его водной толще могут играть процессы метаногенеза, протекающие в анаэробных микроразделах, создаваемых внутри взвешенных в воде органических частиц разлагающегося фитопланктона. В этом случае активное образование метана в воде будет приурочено к зоне термоклина, где ниже подошвы интенсивного развития хлорофилльных водорослей, вследствие задержки их оседающих остатков и массового развития бактерий на этом субстрате, происходит заметное снижение содержания растворенного кислорода [5]. В целом вклад данного источника в формирование концентраций метана в водных экосистемах слабо изучен. По данным натурального мезокосмического эксперимента [5], проведенного на расположенном в пойме Дона рыбобойном пруду, доля протекающего во взвешенном веществе метаногенеза в формирование концентраций метана в воде достигает 25–30%.

Оставшаяся после минерализации в водной толще часть органического вещества поступает в донные отложения, где продолжает разлагаться при содействии аэробных и анаэробных микроорганизмов с образованием  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  и других газов. Например, для Азовского моря до 93% фитопланктона разлагается в ходе деструкции органического вещества в водной толще, остальная часть – в основном за счет анаэробных процессов в донных отложениях [21]. Ввиду того, что метаногены являются облигатными анаэробами, для роста которых требуется низкий окислительно-восстановительный потенциал (диапазон роста от +100 до –500 мВ), то среда, лишенная свободного кислорода и содержащая большое количество органики, будет наиболее благоприятной для развития этих бактерий. Истощение свободного кислорода на окисление органических веществ приводит к активизации в отложениях анаэробных процессов, в ходе которых такие акцепторы электронов как  $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$  (денитрификация),  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  (сульфатредукция) и  $\text{H}_2+\text{CO}_2$  (метаногенез) в соответствии с термодинамикой (снижением выхода энергии в направлении от денитрификации к метаногенезу) последовательно используются для анаэробного окисления органического вещества [40]. Не все эти процессы активно протекают в анаэробной среде донных осадков и, в случае отсутствия или небольшого количества перечисленных акцепторов электронов, некоторые из процессов могут либо полностью подавляться, либо идти в небольшом по мощности слое. Как правило, в биохимической деградации органического вещества в верхних (0–15 см) анаэробных слоях отложений водоемов и водотоков ведущая роль принадлежит процессу восстановления сульфатов сульфатредуцирующими бактериями, тогда как образование  $\text{CH}_4$  метаногенами обычно интенсифицируется в более глубоких слоях, где органические вещества еще содержатся в достаточном количестве, а  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  истощены [18; 21;

25]. Таким образом, в анаэробных условиях  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mn}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  действуют как акцепторы электронов и ингибиторы процесса метаногенеза и, следовательно, способствуют снижению продукции и эмиссии метана [56].

Метаногены очень чувствительны к изменениям температуры [68]. При низких температурах из-за ослабления активности гидролитических, ферментативных и ацетогенных микроорганизмов снижается скорость анаэробного разложения органического вещества и количество питательных субстратов для метаногенов, и, как следствие, уменьшается интенсивность образования метана [31]. С повышением температуры растет разнообразие и численность метаногенов [45], что приводит к значительному увеличению скорости генерации газа. При этом оптимальная температура для метаногенеза обычно составляет 35–40°C [35]. Именно поэтому, более высокие концентрации и удельные потоки метана обычно фиксируются в летний период, а также в светлое время суток – в часы, когда вода максимально прогрета [2].

Большинство чистых культур метанобразующих бактерий развиваются в диапазоне значений pH 6–8 [17; 56], хотя отдельные культуры метаногенов (ацидофильные и алкалофильные) могут осуществлять метаногенез как в кислых болотах с pH до 3, так и в содовых озерах с pH до 10. Поскольку для донных отложений и воды большинства пресноводных водоемов и водотоков характерны нейтральные и слабощелочные условия, то этот фактор не оказывает лимитирующего или стимулирующего влияния на продукцию метана в них [5].

На примере нижнего течения реки Дон и Азовского моря показано, что вклад поступления метана с поверхности водосбора в составе подземного стока, талых и дождевых вод [5] в формирование его концентраций в воде неглубоких водоемов и водотоков степной зоны является незначительным и носит подчиненный характер. Это обусловлено, как малым объемом поступления этих вод в водные объекты, так и низкими концентрациями метана в них. Влияние абразии берегов на формирование концентраций метана в водных экосистемах также незначительно [5].

В процессе диффузионного переноса метана от мест его образования в донных отложениях, ризосфере и воде он может окисляться аэробными или анаэробными путями, что является основным механизмом, снижающим его поток в атмосферу [5; 69]. Аэробное окисление метана осуществляется метанотрофным сообществом бактерий в средах, где сосуществуют метан и кислород. Это, обычно, поверхностный слой донных отложений, ризосфера, водная толща, внутренние ткани растений [5; 18; 19; 31]. В целом, чем больше концентрация растворенного кислорода и глубина водной толщи, тем интенсивнее и в большем объеме в ней окисляется метана, и тем меньше его поступает в атмосферу [5; 69]. При этом метанотрофы менее чувствительны к температуре, чем метаногены, проявляя существенную активность и при низких температурах [69]. Показано [59], что в почвенных, пресноводных и морских экосистемах метанотрофы способны потреблять до 80%

образующегося в донных отложениях метана. Поскольку нитрифицирующие бактерии (нитрификаторы), осуществляющие аэробное окисление  $\text{NH}_4^+$  в воде и донных отложениях, имеют термодинамическое преимущество в конкуренции за активный центр метанмонооксигеназы с метанотрофами, то окисление  $\text{CH}_4$  начинается только после того, как  $\text{NH}_4^+$  израсходован [43]. Поэтому высокие концентрации  $\text{NH}_4^+$  в отложениях и в воде, сопровождающиеся увеличением количества нитрификаторов, могут приводить к сдерживанию роста и активности метанотрофов, и тем самым способствовать накоплению  $\text{CH}_4$  [43].

Анаэробное окисление метана осуществляется консорциумом анаэробных микроорганизмов с использованием таких акцепторов электронов как  $\text{NO}_2^-/\text{NO}_3^-$  (нитрит/нитрат-зависимое анаэробное окисление  $\text{CH}_4$  с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  (денитрификация)), оксиды  $\text{Mn}^{4+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  (металл-зависимое анаэробное окисление  $\text{CH}_4$  с образованием  $\text{HCO}_3^-$  и закисных форм  $\text{Mn}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ ),  $\text{SO}_4^{2-}$  (сульфат-зависимое анаэробное окисление  $\text{CH}_4$  с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{HS}^-$  (сульфатредукция)) [42; 69]. На примере пресных водно-болотных угодий установлено [42], что анаэробное окисление метана может быть ответственно за более чем 50% снижение эмиссии метана в атмосферу.

Вышеописанным объясняется существование в донных отложениях различных водных объектов тесной положительной связи между концентрациями  $\text{CH}_4$  и  $C_{\text{орг}}$  и обратных связей между концентрациями  $\text{CH}_4$  и значениями Eh в отложениях и концентрациями  $\text{CH}_4$  в верхнем горизонте отложений и растворенного  $\text{O}_2$  в придонном слое воды [2; 5; 25]. Также установлены тесные прямые зависимости между концентрациями  $\text{CH}_4$  в воде и отложениях и температурой воды [5; 25], разработана математическая модель, связывающая температуру воды и удельный поток метана в атмосферу [22]. Проведено изучение роли минерализации (солености) и ионного состава вод в формировании концентраций метана в водных экосистемах, которое показало, что их влияние не является определяющим [5].

По данным исследований водных объектов различного типа, в том числе водохранилищ, построены регрессионные модели, аппроксимирующие прямолинейные зависимости между концентрациями  $\text{CH}_4$  и скоростью его метаноокисления в воде и донных отложениях, а также между концентрациями и удельными потоками  $\text{CH}_4$  на границах раздела «донные отложения – вода» и «вода – атмосфера» [8]. С использованием этих эмпирических формул были рассчитаны элементы баланса метана (суммарная эмиссия из донных отложений в воду и из воды в атмосферу, количество окислившегося метана в воде и отложениях) в Мировом океане, Азовском и Черном морях [4; 8]; выполнена оценка эмиссии метана водными объектами Ростовской области, включая водохранилища [10]. Адекватность полученных зависимостей скорости удельного потока метана в атмосферу от его концентраций в поверхностном слое воды и грунтов (донных отложений, торфа, почв, чека иловых площадок) была

подтверждена на примере таких объектов, как реки Дон, Темерник и Мертвый Донец [2], рисовые чеки [11], Иласский, Полистово-Ловатский и Радиловский болотные массивы [23; 24], иловые площадки Ростовской станции аэрации [6] и почвы Ростовской области [12].

#### **Антропогенные факторы формирования концентраций и эмиссионных потоков метана**

На формирование концентраций и потоков метана в водных объектах оказывают воздействие антропогенные факторы, среди которых можно особо выделить зарегулирование стока рек и озер, а также сброс с недостаточной степенью или без очистки промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных сточных вод [5; 25].

Зарегулирование стока рек и озер, создание водохранилищ приводит к изменению водного баланса и гидрологического режима, что, в свою очередь, сказывается на направленности естественных биогеохимических процессов и изменении газового режима водных объектов, в том числе, концентраций метана [5; 16; 47]. Резкое падение гидростатического давления на дне при регулируемом сбросе воды и понижении ее уровня в водохранилище способствует увеличению интенсивности выделения пузырьков газа из донных отложений [44; 47]. Определенный вклад в общую эмиссию метана из водохранилищ, связанных с гидроэлектростанциями, может вносить дегазация метана из потока воды, сбрасываемого через плотину в нижний бьеф [16; 47]. Для глубоких водохранилищ с повышенным водообменом количество дегазируемого метана при сбросе вод может составлять до 70% от общей его эмиссии водохранилищем в атмосферу [50].

Сброс сточных вод, с одной стороны, может привести к непосредственному повышению концентраций метана в природных водах, вследствие сброса обогащенных газом сточных вод, с другой стороны, привносить в водные объекты «антропогенные» вещества, стимулирующие или подавляющие образование метана.

В ходе исследований Шекснинского плеса Рыбинского водохранилища, куда поступают сточные воды Череповецкого металлургического комбината [25], а также участков рек Большая Крепкая и Тузлов (Ростовская область) вблизи прорыва нефтепровода Лисичанск – Тихорецк [2] в донных отложениях выявлены прямолинейные связи между концентрациями метана с одной стороны и нефтяных углеводородов, смолистых компонентов и их суммы, с другой. Связь между  $\text{CH}_4$  и органическими веществами фиксируется и косвенно – по приуроченности максимальных концентраций и потоков  $\text{CH}_4$  к очагам мощного антропогенного загрязнения в водных объектах [2; 5; 25].

Прямое влияние загрязняющих веществ различного типа на образование и создание зон повышенных концентраций метана было установлено также в ходе модельных мезокосменных экспериментов на природных водных объектах [2; 5; 25]. Показано, что при поступлении в водные объекты загрязняющих органических веществ, в частности, нафталина, хинолина, бифенила, фенола, СПАВ, сточных вод, содержащих значительные количества метанола,

наблюдается увеличение концентраций метана. При этом вначале, вследствие окисления поступивших органических соединений, происходит уменьшение концентрации растворённого в воде  $O_2$ , в результате чего активизируются анаэробные процессы в поверхностном слое ила, в том числе метаногенез. Внесение в воду мезокосмов кадмия в самой токсичной ионной форме и концентрациях, значительно превышающих ПДК (в 50–150 раз) [5], вызвало гибель и существенную перестройку структуры естественного сообщества фито- и зоопланктона, в сторону доминирования видов, толерантных по отношению к загрязнению. Вследствие гибели и деструкции погибшего фито- и зоопланктона произошло снижение концентраций растворённого в воде  $O_2$ , что активизировало анаэробные процессы в отложениях, как за счет непосредственного разложения остатков погибших организмов, так и изменения Eh среды в сторону благоприятную для деятельности метаногенов. Добавка в мезокосмы минерального азота и фосфора (вместе и врозь) в концентрациях, характерных для сильнозагрязненных вод, привела к снижению концентраций метана в первые двое – четверо суток, после чего отмечался небольшой рост его содержания (более значительный при одновременном внесении азота и фосфора) [25]. Анализ данных экспедиционных исследований также показал [2; 5; 25], что связь концентраций  $CH_4$  с соединениями азота и фосфора весьма сложна и не всегда характеризуется высокими коэффициентами корреляции.

#### Заключение

Представленный в настоящей статье анализ опубликованных данных показывает, что концентрации и удельные потоки  $CH_4$  в водохранилищах связаны с влиянием гидрологических и морфологических особенностей (уровня воды и температуры, рельефа дна и глубины), обуславливающих интенсивность продукционно-деструкционных процессов, характер механической миграции органического и минерального вещества и распределение литологических типов донных отложений на разных участках водоема. Значительное воздействие оказывают также ветровая активность и поступление соединений углерода, азота и фосфора с поверхности водосбора (в том числе от антропогенных источников) и/или в результате разложения органического вещества почв и растительности, затопленных при наполнении водохранилища. Изменчивость гидрологических и метеорологических условий, а также режим регулирования водохранилищ обуславливает значительную динамику концентраций  $CH_4$  в водной толще и его удельных потоков в атмосферу, что может создавать определенные сложности при оценке годовой суммарной эмиссии данного газа. В целом, при оценке эмиссии  $CH_4$  в атмосферу для каждого водохранилища необходимо учитывать своеобразие комбинированного влияния природных и антропогенных факторов и процессов.

#### Сведения об авторском вкладе

Д.Н. Гарькуша – сбор опубликованных источников, написание статьи.

Ю.А. Фёдоров – сбор опубликованных источников, написание статьи.

А.Е. Косолапов – идея, научное руководство, научное редактирование текста.

Е.В. Усова – написание около 10% текста статьи, научное редактирование текста.

Анпилова Е.Л. – написание около 10% текста статьи, научное редактирование текста.

#### Contribution of the authors

D.N. Gar'kusha – collection of published sources, writing an article.

Yu.A. Fedorov. – collection of published sources, writing an article.

A.E. Kosolapov – idea, scientific guidance, scientific text editing

E.V. Usova – writing about 10% of the text of the article, scientific editing of the text.

E.L. Anpilova – writing about 10% of the text of the article, scientific editing of the text.

#### Список источников

1. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Влияние растений на процессы цикла метана в донных отложениях и ризосфере почв // Сибирский экологический журнал. 2016. № 6. С. 919-934.

2. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Метан в устьевой области реки Дон. Ростов-на-Дону – Москва: ЗАО «Ростиздат», 2010. 181 с.

3. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Метан и сероводород в донных отложениях водохранилищ и прудов бассейна Азовского моря // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 3. С. 37-53. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-3-45-61>

4. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Оценка общего объема, эмиссии и окисления метана в воде и донных отложениях Черного моря // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 12(102). Часть 2. Декабрь. С. 6-13. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.035>

5. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А. Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета. 2021. 366 с.

6. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Плигин А.С. Эмиссия метана на основных этапах технологического цикла очистки сточных вод канализации Ростовской станции аэрации (по экспериментальным данным) // Метеорология и гидрология. 2011. № 7. С. 40-48.

7. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Сухоруков В.В. Эмиссия метана тростниковой формацией побережья Азовского моря // Вода: химия и экология. 2019. № 3-6. С. 78-85.

8. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Расчет элементов баланса метана в водных экосистемах Азовского моря и Мирового океана на основе эмпирических формул // Метеорология и гидрология. 2016. № 6. С. 48-58.

9. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Аджиев Р.А. Распределение метана по акватории и глубине озера Байкал // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 3. С. 308-328.

10. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Крукиер М.Л., Калманович И.В. Оценка эмиссии метана водными объектами Ростовской области // Известия Вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2015. № 3. С. 83-89.
11. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Мельников Е.В. Эмиссия метана рисовыми полями Ростовской области // Почвоведение. 2023. № 8. С. 889-902.
12. Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Трубник Р.Г., Крукиер М.Л. Концентрация и эмиссия метана в различных типах почв Ростовской области // Вопросы степеведения. 2022. № 4. С. 13-24. <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2022-4-13-24>
13. Гречушникова М.Г., Репина И.А., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ломов В.А., Соколов Д.И., Степаненко В.М., Ефимов В.А., Мольков А.А., Капустин И.А. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87, № 6. С. 899-913.
14. Гречушникова М.Г., Школьный Д.И. Оценка эмиссии метана водохранилищами России // Водное хозяйство России. 2019. № 2. С. 58-71. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-2-5>
15. Даценко Ю.С. Особенности и различия абиотических компонентов экосистем озёр и водохранилищ (обзор) // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №1 (29). С. 39-47. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.39.47>
16. Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И., Молодцов Д.В. Выбросы парниковых газов с водохранилищ ГЭС: анализ опыта исследований и организация проведения экспериментов в России // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 11(151). С. 146-159.
17. Заварзин Г.А. Бактерии и состав атмосферы. Москва: Наука, 1984. 199 с.
18. Намсараев Б.Б., Самаркин В.А., Нельсон К., Кламп В., Бухгольц Л., Ремсен К., Майер Ч. Микробиологические процессы круговорота углерода и серы в донных осадках озера Мичиган // Микробиология. 1994. Т. 63, № 4. С. 730-839.
19. Саввичев А.С., Русанов И.И., Пименов Н.В., Мицкевич И.Н., Байрамов И.Т., Леш А.Ю., Иванов М.В. Микробиологические исследования северной части Баренцева моря в начале зимнего сезона // Микробиология. 2000. Т. 69, № 6. С. 819-830.
20. Савенко В.С. Химия водного поверхностного микрослоя. Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. 184 с.
21. Студеникина Е.И., Толоконникова Л.И., Воловик С.П. Микробиологические процессы в Азовском море в условиях антропогенного воздействия. Москва: ФГУП «Нацрыбресурсы», 2002. 188 с.
22. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Крукиер М.Л. Температура и ее влияние на эмиссию метана из водных объектов (по результатам экспериментального и математического моделирования) // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. 2012. № 6. С. 99-101.
23. Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Хромов М.И. Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области // Известия Русского географического общества. 2008. Т. 140, Вып. 5. С. 40-48.
24. Фёдоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Шипкова Г.В. Эмиссия метана торфяными залежами верховых болот Псковской области // География и природные ресурсы. 2015. № 1. С. 88-97.
25. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. 2-е изд., пере-раб. и доп. Ростов-на-Дону; Москва, 2007. 330 с.
26. Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // Global Biogeochem. Cycles. 2004. Vol. 18. Is. 4. <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>
27. Bastviken D., Cole J., Pace M., Van de Bogert M. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH<sub>4</sub> emissions // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. Is. G2. P. 2024-2037. <https://doi.org/10.1029/2007JG000608>
28. Beaulieu J.J., Balz D.A., Birchfield M.K., Harrison J.A., Nietch C.T., Platz M.C., Squier W.C., Waldo S., Walker J.T., White K.M., Young J.L. Effects of an experimental water-level drawdown on methane emissions from a eutrophic reservoir // Ecosystems. 2018. Vol. 21. P. 657-674. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0176-2>
29. Bernhardt E.S., Blaszcak J.R., Ficken C.D., Fork M.L., Kaiser K.E., Seybold E.C. Control points in ecosystems: Moving beyond the hot spot hot moment concept // Ecosystems. 2017. Vol. 20. P. 665-682. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0103-y>
30. Bhaduri D., Mandal A., Chakraborty K., Chatterjee D., Dey R. Interlinked chemical-biological processes in anoxic waterlogged soil – A review // Indian J. Agric. Sci. 2017. Vol. 87. P. 1587-1599. <https://doi.org/10.56093/ijas.v87i12.76483>
31. Bonetti G., Trevathan-Tackett S.M., Hebert N., Carnell P.E., Macreadie P.I. Microbial community dynamics behind major release of methane in constructed wetlands // Appl. Soil Ecol. 2021. Vol. 167. 104163. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104163>
32. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Le Quere C., Myneni R.B., Piao S., Thornton P. Carbon and other biogeochemical cycles // Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. MA: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 2013. P. 465-570.
33. Cicerone R.J., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane // Global Biogeochemical Cycles. 1988. Vol. 2. P. 299-327.
34. Conrad R. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen concentrations in methanogenic soils and sediments // FEMS Microbiology Ecology. 1999. Vol. 28, No. 3. P. 193-202.
35. Conrad R. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs // Advances in Agronomy. 2007. Vol. 96. P. 1-63. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)96005-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)96005-8)
36. Deemer B.R., Harrison J.A., Li S., Beaulieu J.J., del Sontro T., Barros N., Bezerra-Neto J.F., Powers S.M.,

- dos Santos M.A., Vonk J.A.* Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis // *BioScience*. 2016. Vol. 66 (11). P. 949-964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
37. *Desrosiers K., DelSontro T., del Giorgio P.A.* Disproportionate contribution of vegetated habitats to the CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> budgets of a boreal lake // *Ecosystems*. 2022. Vol. 25. P. 1522-1541. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00730-9>
38. EPA, 2010. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. U.S. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs, Washington, DC, USA. 2010. 194 p.
39. *Felix-Faure J., Gaillard J., Descloux S., Chanudet V., Poirel A., Baudoin J.M., Avriillier J.N., Millery A., Dambrine E.* Contribution of flooded soils to sediment and nutrient fluxes in a hydropower reservoir (Sarrans, Central France) // *Ecosystems*. 2019. Vol. 22. P. 312-330. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0274-9>
40. *Froelich P.N., Klinkhammer G.P., Bender M.L., Luedtke G.R., Heath G.R., Cullen D., Dauphin P., Hammond D., Hartman B., Maynard V.* Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1979. Vol. 43. P. 1075-1090. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90095-4)
41. *Giles J.* Methane quashes green credentials of hydropower // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 524-525. <https://doi.org/10.1038/444524a>
42. *Guerrero-Cruz S., Vaksmaa A., Horn M.A., Niemann H., Pijuan M., Ho A.* Methanotrophs: Discoveries, Environmental Relevance, and a Perspective on Current and Future Applications // *Front. Microbiol.* 2021. Vol. 12. 678057. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.678057>
43. *Guo K., Hakobyan A., Glatter T., Paczia N., Liesack W.* Methylocystis sp. Strain SC2 Acclimatizes to Increasing NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Levels by a Precise Rebalancing of Enzymes and Osmolyte Composition // *Msystems*. 2022. Vol. 7. e00403-22. <https://doi.org/10.1128/msystems.00403-22>
44. *Harrison J.A., Deemer B.R., Birchfield M.K., O'Malley M.T.* Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission // *Environmental Science Technology*. 2017. Vol. 51. P. 1267-1277. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185>
45. *Hoj L., Olsen R.A., Torsvik V.L.* Effects of temperature on the diversity and community structure of known methanogenic groups and other archaea in high Arctic peat // *ISME J*. 2008. Vol. 2. P. 37-48. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.84>
46. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report // Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
47. *Jager H.I., Pilla R.M., Hansen C.H., Matson P.G., Iftikhar B., Griffiths N.A.* Understanding how reservoir operations influence methane emissions: a conceptual model // *Water*. 2023. Vol. 15. 4112. <https://doi.org/10.3390/w15234112>
48. *Juutinen S.* Methane fluxes and their environmental controls in the littoral zone of boreal lakes. PhD Dissertations in Biology. University of Joensuu, 2004. 110 p.
49. *Kankaala P., Huotari J., Tulonen T., Ojala A.* Lake-size dependent physical forcing drives carbon dioxide and methane effluxes from lakes in a boreal landscape // *Limnol. Oceanogr.* 2013. Vol. 58. P. 1915-1930. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.6.1915>
50. *Kemenes A., Melack J., Forsberg B.* Downstream emissions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin // *Inland Wat.* 2006. Vol. 6. P. 295-302. <https://doi.org/10.1080/TW-6.3.980>
51. *Kettunen A., Kaitala V., Alm J., Silvola J., Nykanen H., Martikainen P.J.* Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from a boreal peatland // *Global Biogeochemical Cycles*. 1996. Vol. 10, № 3. P. 457-471. <https://doi.org/10.1029/96GB01609>
52. *Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J.* Trends in globally-averaged CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and SF<sub>6</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. Version 2024-04, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10> (дата обращения: 11.04.2024).
53. *Lima I., Ramos F., Bambace L., Rosa R.* Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective // *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*. 2006. Vol. 13. P. 1381-1386. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
54. *Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin E., Rudd J.W.M., Rosenberg D.M.* Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate // *Bioscience*. 2000. Vol. 50. P. 766-775.
55. *MacDonald I.R., Leifer I., Sassen R., Stine P., Mitchell R., Guinasso N.* Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere // *Geofluids*. 2002. Vol. 2(2). P. 95-107. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00023.x>
56. *Malyan S.K., Singh O., Kumar A., Anand G., Singh R., Singh S., Yu Z., Kumar J., Fagodiya R.K., Kumar A.* Greenhouse gases trade-off from ponds: an overview of emission process and their driving factors // *Water*. 2022. Vol. 14. 970. <https://doi.org/10.3390/w14060970>
57. *Michmerhuizen C.M., Striegl R.G., McDonald M.E.* Potential methane emission from north-temperate lakes following ice melt // *Limnology and Oceanography*. 1996. Vol. 41. P. 985-991.
58. *Miller B., Arntzen E., Goldman A., Richmond M.* Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions // *Environmental Management*. 2017. Vol. 60. P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0909-1>
59. *Reeburg W.S., Whalen S.C., Alperin M.J.* The role of methyloctrophy in the global methane budget // *Microbial growth on C1-compounds*. 1993. P. 1-14.
60. *Saunois, M., Stavert, A., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J., Jackson, R., Raymond, P., Dlugokencky, E., Houweling, S., Patra, P., Ciais, P., Arora, V., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, C., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P., Covey, K., Curry, C., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K., Joos, F., Kleinen, T., Krummel,*

- P., Langenfelds, R., Laruelle, G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K., McNorton, J., Miller, P., Melton, J., Morino, I., Müller, J., Murguia-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R., Peng, C., Peng, S., Peters, G., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W., Rosentretter, J., Segers, A., Simpson, I., Shi, H., Smith, S., Steele, P., Thornton, B., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T., van Weele, M., van der Werf, G., Weiss, R., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q. and Zhuang, Q. The Global Methane Budget 2000-2017, Earth System Science Data, 2019. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-128> (дата обращения: 11.04.2024).
61. Schmale O., Greinert J., Rehder G. Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea into the atmosphere // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32(7). <https://doi.org/10.1029/2004GL021138>
62. Sebacher D.I., Harriss R.C., Bartlett K.B. Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants // Environmental Quality. 1985. Vol. 14. P. 40-46. <https://doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400010008>
63. Striegl R.G., Michmerhuizen C.M. Hydrological influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43. P. 1519-1529.
64. Varis O., Kumm M., Härkönen S., Huttunen J.T. Greenhouse gas emissions from reservoirs / In: Impacts of Large Dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management. Berlin, Heidelberg. 2012. P. 69-94.
65. Waldo S., Beaulieu J.J., Barnett W., Balz D.A., Vanni M.J., Williamson T., Walker J.T. Temporal trends in methane emissions from a small eutrophic reservoir: The key role of a spring burst // Biogeosciences. 2021. Vol. 18. P. 5291-5311. <https://doi.org/10.5194/bg-18-5291-2021>
66. Wallenius A.J., Martins Pa.D., Slomp C.P., Jetten M.S.M. Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments // Front. Microbiol. 2021. Vol. 12. 631621. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631621>
67. Wang H., Wang W., Yin C., Wang Y., Lu J. Littoral zones as the "hotspots" of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission in a hyper-eutrophic lake in China // Atmos. Environ. 2006. Vol. 40. P. 5522-5527.
68. Wu X.L., Chin K.J., Conrad R. Effect of temperature stress on structure and function of the methanogenic archaeal community in a rice field soil // FEMS Microbiol. Ecol. 2002. Vol. 39. P. 211-218. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2002.tb00923.x>
69. Yin X., Jiang C., Xu S., Yu X., Yin X., Wang J., Maihaiti M., Wang C., Zheng X., Zhuang X. Greenhouse gases emissions of constructed wetlands: mechanisms and affecting factors // Water. 2023. Vol. 15. 2871. <https://doi.org/10.3390/w15162871>
- the rhizosphere of soils]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*. (6), pp. 919-934. (in Russian)
2. Gar'kusha, D. and Fedorov, Yu., 2010. *Metan v ustyevoy oblasti reki Don* [Methane in the estuary region of the Don River]. Rostov-on-Don – Moscow, CJSC "Rostizdat". 181 p. (in Russian)
3. Gar'kusha, D. and Fedorov, Yu., 2022. Methane and hydrogen sulfide in bottom sediments of reservoirs and ponds of the Azov Sea basin. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki*. (3). pp. 37-53. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2022-3-45-61> (in Russian)
4. Gar'kusha, D. and Fedorov, Yu., 2020. Estimation of the total volume, emissions and oxidation of methane in the water and bottom sediments of the Black Sea. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, (12(102)), pp. 6-13. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.035> (in Russian)
5. Gar'kusha, D. and Fedorov, Yu., 2021. *Faktory formirovaniya kontsentratsiy metana v vodnykh ekosistemakh* [Factors of formation of methane concentrations in aquatic ecosystems]. Rostov-on-Don. Southern Federal University publ. 366 p. (in Russian)
6. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu. and Pligin, A., 2011. Emissiya metana na osnovnykh etapakh tekhnologicheskogo tsikla ochistki stochnykh vod kanalizatsii Rostovskoy stantsii aeratsii (po eksperimentalnym dannym) [Methane emission at the main stages of the technological cycle of sewage treatment at the Rostov aeration station (according to experimental data)]. *Meteorologiya i gidrologiya*. (7). pp. 40-48. (in Russian)
7. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu. and Sukhorukov, V., 2019. Emissiya metana trostnikovoy formatsiyey poberezhia Azovskogo morya [Methane emission by the reed formation of the coast of the Sea of Azov]. *Voda: khimiya i ekologiya*. (3–6). pp. 78-85. (in Russian)
8. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu. and Tambieva, N., 2016. Raschet elementov balansa metana v vodnykh ekosistemakh Azovskogo morya i Mirovogo okeana na osnove empiricheskikh formul [Calculation of methane balance elements in aquatic ecosystems of the Sea of Azov and the World Ocean based on empirical formulas]. *Meteorologiya i gidrologiya*. (6). pp. 48-58. (in Russian)
9. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu., Tambieva, N., Andreyev, Yu. and Adzhiyev, R., 2023. Raspredeleniye metana po akvatorii i glubine ozera Baykal [Distribution of methane over the water area and depth of Lake Baikal]. *Vodnyye resursy*. 50 (3). pp. 308-328. (in Russian)
10. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu., Tambieva, N., Krukiyer, M. and Kalmanovich, I., 2015. Otsenka emissii metana vodnymi obyektami Rostovskoy oblasti [Assessment of methane emissions by water bodies of the Rostov region]. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki*. (3), pp. 83-89. (in Russian)
11. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu., Tambieva, N. and Mel'nikov, E., 2023. Emissiya metana risovymi polyami Rostovskoy oblasti [Methane emission from rice fields of the Rostov region]. *Pochvovedeniye*. (8), pp. 889-902. (in Russian)
12. Gar'kusha, D., Fedorov, Yu., Trubnik, R. and Krukiyer, M., 2022. Methane concentration and emission in various types of soils of the Rostov region. *Voprosy*

## References

1. Gar'kusha, D. and Fedorov, Yu., 2016. Vliyaniye rasteniy na protsessy tsikla metana v donnykh otlozheniyakh i rizosfere pochv [The influence of plants on the processes of the methane cycle in bottom sediments and

- stepevedeniya, (4), pp. 13-24. <https://doi.org/10.24412/2712-8628-2022-4-13-24> (in Russian)
13. Grechushnikova, M., Repina, I., Frolova, N., Agafonova, S., Lomov, V., Sokolov, D., Stepanenko, V., Efimov, V., Molkov, A. and Kapustin, I., 2023. Soderzhaniye i potoki metana v Volzhskikh vodokhranilishchakh [Methane content and fluxes in Volga reservoirs]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Seriya geograficheskaya*. 87(6), pp. 899-913. (in Russian)
14. Grechushnikova, M. and Shkolnyy, D., 2019. Estimation of methane emission from reservoirs of Russia. *Vodnoye khozyaystvo Rossii*, (2), pp. 58-71. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2019-2-5> (in Russian)
15. Datsenko, Yu., 2022. Features and differences of abiotic components in lakes and reservoirs ecosystems (review). *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii*, (1(29)), pp. 39-47. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.39.47> (in Russian)
16. Elistratov, V., Maslikov, V., Sidorenko, G. and Molodtsov, D., 2014. Vybrosty parnikovykh gazov s vodokhranilishch GES: analiz opyta issledovaniy i organizatsiya provedeniya eksperimentov v Rossii [Greenhouse gas emissions from HPP reservoirs: analysis of research experience and organization of experiments in Russia]. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. (11(151)), pp. 146-159. (in Russian)
17. Zavarzin, G., 1984. *Bakterii i sostav atmosfery* [Bacteria and atmospheric composition]. Moscow, Nauka publ. 199 p. (in Russian)
18. Namsarayev, B., Samarkin, V.A., Nelson, K., Klamp, V., Bukhgolts, L., Remsen, K. and Mayer, Ch., 1994. Mikrobiologicheskiye protsessy krugovorota ugleroda i sery v donnykh osadkakh ozera Michigan” [Microbiological processes of carbon and sulfur cycling in bottom sediments of Lake Michigan]. *Mikrobiologiya*. 63(4), pp. 730-839. (in Russian)
19. Savvichev, A., Rusanov, I., Pimenov, N., Mitskevich, I., Bayramov, I., Lein, A. and Ivanov, M., 2000. Mikrobiologicheskiye issledovaniya severnoy chasti Barentseva morya v nachale zimnego sezona [Microbiological studies of the northern part of the Barents Sea at the beginning of the winter season]. *Mikrobiologiya*. 69(6), pp. 819-830. (in Russian)
20. Savenko, V., 1990. *Khimiya vodnogo poverkhnostnogo mikrosloya* [Chemistry of an aqueous surface microlayer], Leningrad, Gidrometeoizdat publ. 184 p. (in Russian)
21. Studenikina, E., Tolokonnikova, L. and Volovik, S., 2002. *Mikrobiologicheskiye protsessy v Azovskom more v usloviyakh antropogennogo vozdeystviya* [Microbiological processes in the Sea of Azov under conditions of anthropogenic impact]. Moscow, FGUP «Natsyrbresursy». 188 p. (in Russian)
22. Fedorov, Yu., Gar’kusha, D. and Krukiyer, M., 2012. Temperatura i eye vliyaniye na emissiyu metana iz vodnykh obyektov (po rezul’tatam eksperimentalnogo i matematicheskogo modelirovaniya) [Temperature and its effect on methane emission from water bodies (based on the results of experimental and mathematical modeling)]. *Izvestiya Vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennyye nauki*. (6), pp. 99-101. (in Russian)
23. Fedorov, Yu., Gar’kusha, D. and Khromov, M., 2008. Emissiya metana s torfyanykh zalezhey Ilasskogo bolotnogo massiva Arkhangel’skoy oblasti [Methane emission from peat deposits of the Ilassky marsh massif of the Arkhangel’sk region]. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 140(5), pp. 40-48. (in Russian)
24. Fedorov, Yu., Gar’kusha, D. and Shipkova, G., 2015. Emissiya metana torfyanyimi zalezhami verkhovykh bolot Pskovskoy oblasti [Methane emission from peat deposits of upland marshes of the Pskov region]. *Geografiya i prirodnyye resursy*. (1), pp. 88-97. (in Russian)
25. Fedorov, Yu., Tambieva, N., Gar’kusha, D. and Khoroshevskaya, V., 2007. *Metan v vodnykh ekosistemakh* [Methane in aquatic ecosystems]. Rostov-on-Don, Moscow. 330 p. (in Russian)
26. Bastviken, D., Cole, J., Pace, M. and Tranvik, L., 2004. Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochem. Cycles*, 18(4). <https://doi.org/10.1029/2004GB002238>
27. Bastviken, D., Cole, J., Pace, M. and Van de Bogert, M., 2008. Fates of methane from different lake habitats: Connecting whole-lake budgets and CH<sub>4</sub> emissions. *J. Geophys. Res.*, 113(G2), pp. 2024-2037. <https://doi.org/10.1029/2007JG000608>
28. Beaulieu J., Balz D., Birchfield M., Harrison J., Nietch C., Platz M., Squier W., Waldo S., Walker J., White K. and Young J., 2018. Effects of an experimental water-level drawdown on methane emissions from a eutrophic reservoir. *Ecosystems*, 21, pp. 657-674. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0176-2>
29. Bernhardt, E., Blaszcak, J., Ficken, C., Fork, M., Kaiser, K. and Seybold, E., 2017. Control points in ecosystems: Moving beyond the hot spot hot moment concept. *Ecosystems*, 20, pp. 665-682. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0103-y>
30. Bhaduri, D., Mandal, A., Chakraborty, K., Chatterjee, D. and Dey R., 2017. Interlinked chemical-biological processes in anoxic waterlogged soil – A review. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 87(12), pp. 1587-1599. <https://doi.org/10.56093/ijas.v87i12.76483>
31. Bonetti, G., Trevathan-Tackett, S., Hebert, N., Carnell, P., and Macreadie, P., 2021. Microbial community dynamics behind major release of methane in constructed wetlands. *Applied Soil Ecology*, 167(104163). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104163>
32. Ciais, P., Sabine, C., Bala, G. Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quere, C., Myneni, R., Piao, S. and Thornton, P., 2013. Carbon and other biogeochemical cycles. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, pp. 465-570.
33. Cicerone, R. and Oremland, R., 1988. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. *Global Biogeochemical Cycles*, 2, pp. 299-327.
34. Conrad, R., 1999. Contribution of hydrogen to methane production and control of hydrogen

- concentrations in methanogenic soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 28(3), pp. 193-202.
35. Conrad, R., 2007. Microbial ecology of methanogens and methanotrophs. *Advances in Agronomy*, 96, pp. 1-63. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)96005-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)96005-8)
36. Deemer, B., Harrison, J., Li S., Beaulieu, J., del Sontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J., Powers, S., dos Santos, M. and Vonk, J., 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience*, 66(11), pp. 949-964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>
37. Desrosiers, K., DelSontro, T. and del Giorgio, P., 2022. Disproportionate contribution of vegetated habitats to the CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> budgets of a boreal lake. *Ecosystems*, 25, pp. 1522-1541. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00730-9>
38. EPA, 2010. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. U.S. Environmental Protection Agency Office of Atmospheric Programs, Washington, DC, USA. 194 p.
39. Felix-Faure, J., Gaillard, J., Descloux, S., Chanudet, V., Poirel, A., Baudoin, J., Avrillier J., Millery A. and Dambrine E., 2019. Contribution of flooded soils to sediment and nutrient fluxes in a hydropower reservoir (Sarrans, Central France). *Ecosystems*, 22, pp. 312-330. <https://doi.org/10.1007/s10021-018-0274-9>
40. Froelich, P., Klinkhammer, G., Bender, M., Luedtke, G., Heath, G., Cullen, D., Dauphin, P., Hammond, D., Hartman, B. and Maynard, V., 1979. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43, pp. 1075-1090. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(79\)90095-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(79)90095-4)
41. Giles, J., 2006. Methane quashes green credentials of hydropower. *Nature*, 444, pp. 524-525. <https://doi.org/10.1038/444524a>
42. Guerrero-Cruz, S., Vaksmaa, A., Horn, M., Niemann, H., Pijuan, M. and Ho, A., 2021. Methanotrophs: Discoveries, Environmental Relevance, and a Perspective on Current and Future Applications. *Front. Microbiol.*, 12(678057). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.678057>
43. Guo, K., Hakobyan, A., Glatte, T., Paczia, N., Liesack, W., 2022. Methylocystis sp. Strain SC2 Acclimatizes to Increasing NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Levels by a Precise Rebalancing of Enzymes and Osmolyte Composition. *Msystems.*, 7(e00403-22). <https://doi.org/10.1128/msystems.00403-22>
44. Harrison, J., Deemer, B., Birchfield, M., O'Malley, M., 2017. Reservoir water-level drawdowns accelerate and amplify methane emission. *Environmental Science Technology*, 51, pp. 1267-1277. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03185>
45. Hoj, L., Olsen, R. and Torsvik, V., 2008. Effects of temperature on the diversity and community structure of known methanogenic groups and other archaea in high Arctic peat. *ISME J.*, 2, pp. 37-48. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.84>
46. IPCC Climate Change 2014. Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland, 151 p.
47. Jager, H., Pilla, R., Hansen, C., Matson, P., Iftikhar, B. and Griffiths, N., 2023. Understanding how reservoir operations influence methane emissions: a conceptual model. *Water*, 15(4112). <https://doi.org/10.3390/w15234112>
48. Juutinen, S., 2004. *Methane fluxes and their environmental controls in the littoral zone of boreal lakes*. Doctor's Dissertation of Sciences in Biology. University of Joensuu, 110 p.
49. Kankaala, P., Huotari, J., Tulonen, T. and Ojala, A., 2013. Lake-size dependent physical forcing drives carbon dioxide and methane effluxes from lakes in a boreal landscape. *Limnol. Oceanogr.*, 58, pp. 1915-1930. <https://doi.org/10.4319/lo.2013.58.6.1915>
50. Kemenes, A., Melack, J. and Forsberg, B., 2006. Downstream emissions of CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin. *Inland Wat.*, 6, pp. 295-302. <https://doi.org/10.1080/IW-6.3.980>
51. Kettunen, A., Kaitala, V., Alm, J., Silvola, J., Nykanen, H. and Martikainen, P., 1996. Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from a boreal peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(3), pp. 457-471. <https://doi.org/10.1029/96GB01609>
52. Lan, X., Thoning, K. and Dlugokencky, E., 2024. Trends in globally-averaged CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, and SF<sub>6</sub> determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements. <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10> [Accessed 11th April 2024].
53. Lima, I., Ramos, F., Bambace, L. and Rosa, R., 2006. Methane emissions from large dams as renewable energy resources: a developing nation perspective. *Mitigation Adaptation Strategy Global Change*, 13, pp. 1381-1386. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
54. Louis, V., Kelly, C., Duchemin, E., Rudd, J. and Rosenberg, D., 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience*, 50, pp. 766-775.
55. MacDonald, I., Leifer, I., Sassen, R., Stine, P., Mitchell, R. and Guinasso, N., 2002. Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere. *Geofluids*, 2(2), pp. 95-107. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2002.00023.x>
56. Malyan, S., Singh, O., Kumar, A., Anand, G., Singh, R., Singh, S., Yu, Z., Kumar, J., Fagodiya, R. and Kumar, A., 2022. Greenhouse gases trade-off from ponds: an overview of emission process and their driving factors. *Water*, 14(970). <https://doi.org/10.3390/w14060970>
57. Michmerhuizen, C., Striegl, R. and McDonald, M., 1996. Potential methane emission from north-temperate lakes following ice melt. *Limnology and Oceanography*, 41, pp. 985-991.
58. Miller, B., Arntzen, E., Goldman, A. and Richmond, M., 2017. Methane ebullition in temperate hydropower reservoirs and implications for US policy on greenhouse gas emissions. *Environmental Management*, 60, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0909-1>
59. Reeburg, W., Whalen, S., Alperin, M., 1993. The role of methylotrophy in the global methane budget. *Microbial growth on C1-compounds*, pp. 1-14.
60. Saunio, M., Stavert, A., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J., Jackson, R., Raymond, P., Dlugokencky, E.,

- Houweling, S., Patra, P., Ciais, P., Arora, V., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, C., Carrol, M., Castaldi, S., Chandra, N., Crevoisier, C., Crill, P., Covey, K., Curry, C., Etiope, G., Frankenberg, C., Gedney, N., Hegglin, M., Höglund-Isaksson, L., Hugelius, G., Ishizawa, M., Ito, A., Janssens-Maenhout, G., Jensen, K., Joos, F., Kleinen, T., Krummel, P., Langenfelds, R., Laruelle, G., Liu, L., Machida, T., Maksyutov, S., McDonald, K., McNorton, J., Miller, P., Melton, J., Morino, I., Müller, J., Murguía-Flores, F., Naik, V., Niwa, Y., Noce, S., O'Doherty, S., Parker, R., Peng, C., Peng, S., Peters, G., Prigent, C., Prinn, R., Ramonet, M., Regnier, P., Riley, W., Rosentretter, J., Segers, A., Simpson, I., Shi, H., Smith, S., Steele, P., Thornton, B., Tian, H., Tohjima, Y., Tubiello, F., Tsuruta, A., Viovy, N., Voulgarakis, A., Weber, T., van Weele, M., van der Werf, G., Weiss, R., Worthy, D., Wunch, D., Yin, Y., Yoshida, Y., Zhang, W., Zhang, Z., Zhao, Y., Zheng, B., Zhu, Q., Zhu, Q. and Zhuang, Q., 2019. The Global Methane Budget 2000-2017, Earth System Science Data. <https://doi.org/10.5194/essd-2019-128> [Accessed 11th April 2024].
61. Schmale, O., Greinert, J. and Rehder, G., 2005. Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea into the atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 32(7). <https://doi.org/10.1029/2004GL021138>
62. Sebacher, D., Harriss, R. and Bartlett, K., 1985. Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants", *Environmental Quality*, vol. 14. pp. 40-46. <https://doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400010008.x>
63. Striegl, R. and Michmerhuizen, C., 1998. Hydrological influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes. *Limnology and Oceanography*, 43. pp. 1519-1529.
64. Varis, O., Kumm, M., Härkönen, S. and Huttunen, J., 2012. Greenhouse gas emissions from reservoirs. In: *Impacts of Large Dams: A Global Assessment. Water Resources Development and Management*, Berlin, Heidelberg, pp. 69-94.
65. Waldo, S., Beaulieu, J., Barnett, W., Balz, D., Vanni, M., Williamson, T. and Walker, J., 2021. Temporal trends in methane emissions from a small eutrophic reservoir: The key role of a spring burst. *Biogeosciences*, 18. pp. 5291-5311. <https://doi.org/10.5194/bg-18-5291-2021>
66. Wallenius, A.J., Martins, Pa.D., Slomp, C.P., Jetten, M.S.M. (2021), "Anthropogenic and Environmental Constraints on the Microbial Methane Cycle in Coastal Sediments", *Front. Microbiol.*, vol. 12. 631621. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631621>
67. Wang, H., Wang, W., Yin, C., Wang, Y. and Lu, J., 2006. Littoral zones as the "hotspots" of nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission in a hyper-eutrophic lake in China. *Atmos. Environ.*, 40. pp. 5522-5527.
68. Wu, X., Chin, K. and Conrad, R., 2002. Effect of temperature stress on structure and function of the methanogenic archaeal community in a rice field soil. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 39. pp. 211-218. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2002.tb00923.x>
69. Yin, X., Jiang, C., Xu, S., Yu, X., Yin, X., Wang, J., Maihaiti, M., Wang, C., Zheng, X. and Zhuang, X., 2023. Greenhouse gases emissions of constructed wetlands: mechanisms and affecting factors. *Water*, 15(2871) <https://doi.org/10.3390/w15162871>

Статья поступила в редакцию 29.05.2024; одобрена после рецензирования 30.05.2024; принята к публикации 30.05.2024.

The article was submitted 29.05.2024; approved after reviewing 30.05.2024; accepted for publication 30.05.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 502.3

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63>

**Биоремедиация *in situ* нефтезагрязненных почв на территории Полазненского месторождения**

Дарья Олеговна Егорова<sup>1</sup>, Евгений Валерьевич Ташкинов<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет» (ПГНИУ)

<sup>1</sup> [daryao@rambler.ru](mailto:daryao@rambler.ru)

<sup>2</sup> [zafranceperm@mail.ru](mailto:zafranceperm@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлены результаты полевых исследований (*in situ*) очистки нефтезагрязненных территорий с использованием фиторемедиационных и биоаугментационных технологий. Исследования проведены в летне-осенний период на территории Полазненского месторождения вблизи д. Зуята Добрянского городского округа, Пермского края. Технологии фито- и биоремедиации являются наиболее безопасными для окружающей среды и наименее затратными с экономических позиций. В результате проведенных полевых исследований и лабораторных анализов показано, что применение биопрепарата «БИОРЕК-РА» и высев семян люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.), овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.) позволили снизить концентрацию загрязнителя (нефтяных углеводородов) до уровня ниже ПДК в первый месяц эксперимента. На протяжении последующего полуторамесячного периода концентрация нефтяных углеводородов снижалась. Данное изменение содержания загрязнителя достоверно отличалось от изменения аналогичного показателя в контрольной почве. Таким образом, примененные технологии фито- и биоремедиации показали их перспективность для данной местности.

**Ключевые слова:** бактерии, штаммы, очистка почв, биопрепараты, фиторемедиация

**Для цитирования:** Егорова Д.О., Ташкинов Е.В. Биоремедиация *in situ* нефтезагрязненных почв на территории Полазненского месторождения // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 51-63. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63>

## SECTION 2. POLLUTION

Original paper

**Bioremediation *in situ* of oil-contaminated soils in the Polaznenskoe oil field area**

Darya O. Egorova<sup>1</sup>, Evgeny V. Tashkinov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Perm State University (PSU)

<sup>1</sup> [daryao@rambler.ru](mailto:daryao@rambler.ru)

<sup>2</sup> [zafranceperm@mail.ru](mailto:zafranceperm@mail.ru)

**Abstract.** The article presents the results of field research on the *in situ* remediation of oil-contaminated areas using phytoremediation and bioaugmentation technologies. The research was conducted in the summer-autumn period at the Polaznen oil field near the village of Zuyat in the Dobryansky city district of the Perm region. Phytoremediation and bioremediation technologies are considered to be the safest for the environment and the most cost-effective from an economic standpoint. The application of the bioremediation product "Biorec-Ra" and the sowing of seeds of black medic (*Medicago lupulina* L.), meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.), and perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) helped to reduce the concentration of the pollutant (petroleum hydrocarbons) to below the MAC in the first month of the experiment. Over the following month and a half, the concentration of petroleum hydrocarbons continued to decrease. This change in pollutant content was significantly different from the change in the same indicator in the control soil. Thus, the applied phytoremediation and bioremediation technologies have shown promise for this particular area.

**Keywords:** bacteria, strains, soil remediation, bio-preparations, phytoremediation

**For citation:** Egorova, D., Tashkinov, E., 2024. Bioremediation *in situ* of oil-contaminated soils in the Polaznenskoe oil field area. *Anthropogenic Transformation of Nature*. 10(1). pp. 51-63. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-51-63> (in Russian)

**Введение**

Нефтегазодобывающая отрасль промышленности – одна из наиболее экологически опасных в настоящее

время. Она характеризуется высокой опасностью как с позиций землеемкости, так и с позиций проникновения

в окружающую среду загрязняющих соединений, а также высокой пожаро- и взрывоопасностью объектов.

В России разработка нефтяных и газонефтяных месторождений ведется более чем в 30 регионах [3, 22].

По данным на 2019 г. 82,6% от всей нефтедобычи в стране приходится на долю десяти регионов (рис. 1 / fig. 1).

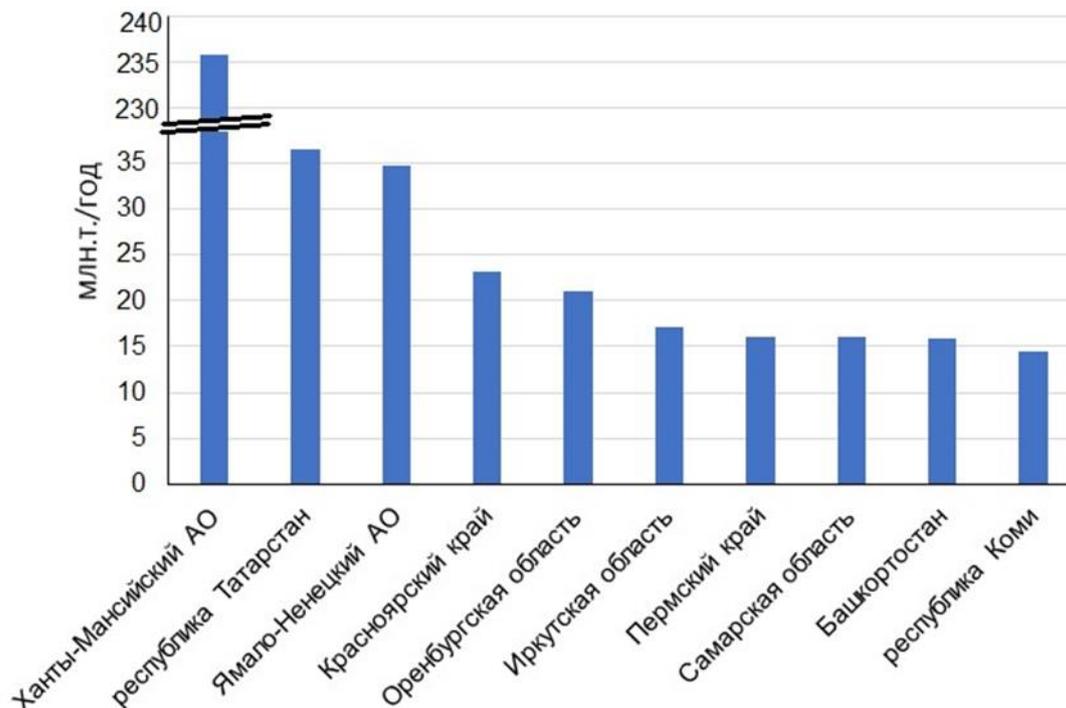


Рис. 1. Объемы добычи нефти в десяти регионах-лидерах в 2019 г.

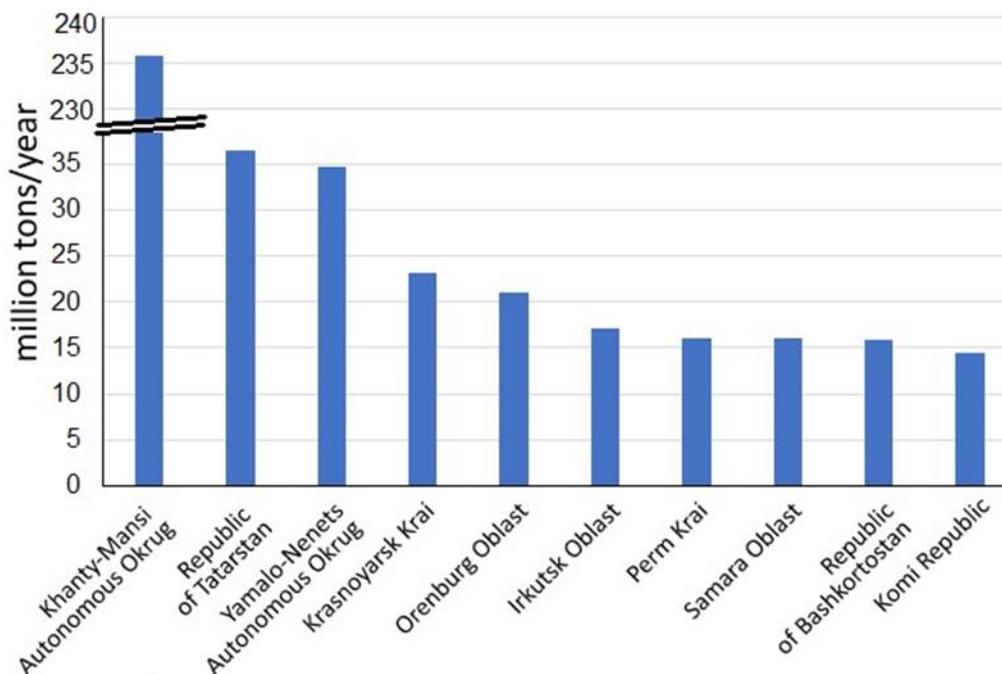


Fig. 1. Oil production volumes in the TOP-10 regions in 2019

Известно, что нефтяное загрязнение приводит к уменьшению продуктивности земель, загрязнению поверхностных и подземных вод и деградации ландшафтов, таким образом оказывая комплексное воздействие на окружающую среду. В случаях нарушения эксплуа-

тации скважин происходят разливы нефти, нефтепродуктов и соленых пластовых вод. К основным загрязняющими веществами, образующимися в процессе нефтедобычи и нефтепереработки, относятся углеводороды (48 %) и CO<sub>2</sub> (44 %) [23, 26]. Наиболее токсич-

ными компонентами нефти являются полициклические ароматические углеводороды (1-4% от объема нефти). Встречающийся в составе некоторых нефтей бензапирен обладает мутагенной и канцерогенной активностью и относится к I классу опасности.

Разлив нефти по поверхности почвы приводит к первоначальному загрязнению верхнего органоминерального слоя почвы, но в результате проникновения углеводородов внутрь почвенного слоя, загрязнение может со временем обнаруживаться на глубине до 140-160 см [10]. Основными препятствиями для просачивания нефти на нижние горизонты почвы являются барьеры-экраны, к которым относятся глеевые горизонты и тяжелые грунты. Однако, в этом случае происходит распространение нефти и нефтепродуктов в горизонтальном направлении, что приводит к расширению зоны загрязнения. Также барьером, предотвращающим проникновение нефти в почву, является вода. Хорошими абсорбентами выступают травяные растения и мхи. Тяжелые фракции нефти обычно сорбируются в верхнем слое почвы, тогда как легкие фракции способны к испарению или подвергаются биологическому, или химическому разложению [25]. Нефть, обладая выраженными гидрофобными свойствами, попадая в почву, сильно изменяет ее физические характеристики, а именно снижает проницаемость для кислорода и воды. Происходит это в следствии склеивания структурных частиц почвы, а также покрытия их углеводородной пленкой, что приводит к нарушению процессов активного переноса полезных соединений с током воды. Концентрации минеральных элементов, в частности азота, спустя некоторое время после разлива нефтесодержащей жидкости, снижаются. Также отмечается рост содержания аммиачного азота и снижение (до незначительных количеств) нитратного азота в почве, которые обусловлены нарушением водного режима и аэрации. В естественных условиях, особенно при низких температурах, компоненты нефти длительное время остаются без изменений [1]. Таким образом, привнесение нефти и нефтепродуктов в почву может привести к нарушению ряда ее свойств: морфологических, физических, физико-химических и микробиологических [13, 15, 27, 28].

Наиболее частые причины разливов нефти: нарушения при добыче, хранении, транспортировке, при переработке и нарушения технологий эксплуатации. Еще одна значимая причина – коррозия и неудовлетворительное качество строительно-монтажных работ, которые ведут к износу оборудования и, далее, к разливам нефти. Единичные случаи разливов, связаны с заводским браком и ошибками эксплуатации.

Нормативно-правовые документы, действующие в РФ, требуют проведения локализации и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов в самые короткие сроки. Аналогичное требование характерно и для сроков проведения рекультивации загрязненных участков до допустимого уровня остаточного содержания углеводородов в окружающей среде. Все участки, утратившие продуктивность полностью или частично, подлежат восстановлению. Конечной целью восстановления, рекультивации следует считать экологически устойчивый ландшафт с полноценным потенциалом экосистемных услуг (рис. 2 / fig. 2) [16-18, 24].

Рекультивация нарушенных земель осуществляется в несколько этапов. В соответствии с требованиями ГОСТ Р 59070-2020 [6] в рекультивации земель, нарушенных промышленной деятельностью, выделяют три этапа:

- 1) подготовительный;
- 2) технический;
- 3) биологический.

Продолжительность технического и биологического этапов условно называют рекультивационным периодом, который может длиться до нескольких десятилетий, в зависимости от уровня нарушенности территории и ее целевого использования. Таким образом, суммарная продолжительность основных этапов обусловлена сроком, необходимым для полного восстановления всех природных компонентов.

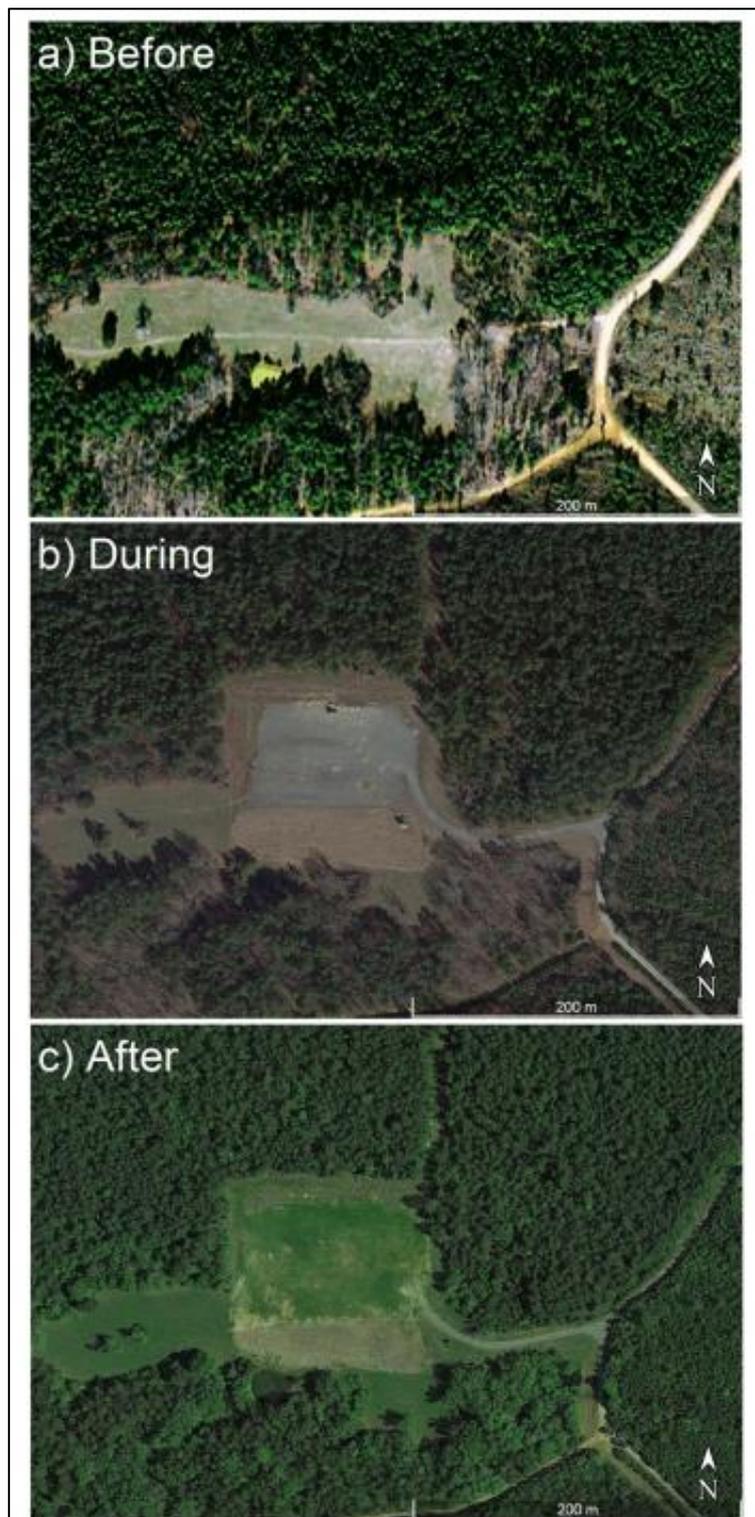
**Подготовительный этап** состоит в изучении степени нарушенности земель. Также необходимо определить вероятное или предпочтительное направление использования нарушенных земель в дальнейшем процессе природопользования. Часто проект рекультивации затрагивает интересы сразу нескольких отраслей народного хозяйства. Основные задачи подготовительного этапа [4]:

- определение основных свойств плодородного слоя и его ценности;
- расчет затрат (и их экономической рентабельности) на сохранение или использование плодородного слоя;
- выбор направления рекультивации отдельных объектов и нарушаемых земель в целом на рассматриваемой территории на основании определения хозяйственной целесообразности и экономической эффективности;
- разработка комплексных рекомендаций по выбору технологий механизированной обработки (технологический этап);
- выбор технологии и комплексной механизации основного производства, удовлетворяющих требованиям последующей рекультивации нарушенных земель;
- разработка технологии биологической рекультивации нарушенных земель;
- определение условий последующей эксплуатации рекультивированных земель при выбранном виде использования;
- определение отраслевой, общей и сравнительной эффективности капитальных вложений и эксплуатационных расходов [4].

Необходимым условием рекультивации следует считать проведение изыскательских и научно-исследовательских работ, подготовку полноценной проектной документации.

**Техническая рекультивация (Технический этап)** – этап рекультивации земель, обуславливающий их подготовку для последующего целевого использования в народном хозяйстве [5].

Технический этап включает в себя планировку, формирование откосов, снятие, транспортирование и нанесение почв и плодородных пород на рекультивируемые земли, при необходимости коренную мелиорацию, строительство дорог и специальных гидротехнических сооружений [4].



**Рис. 2.** Ландшафт естественного леса и пастбища: а) до разработки колодезной площадки (2006 г.), б) во время эксплуатации колодезной площадки (2012 г.), в) после «восстановления» колодезной площадки под пастбище (2016 г.) [31]

**Fig. 2.** Landscape of natural forest and pasture: a) before the development of the well site (2006), b) during the operation of the well site (2012), c) after the “restoration” of the well site for pasture (2016) [32]

Основные работы, выполняемые во время технического этапа (полный перечень зависит от последующего целевого использования восстанавливаемых земель):

- грубая и чистовая планировка поверхности отвалов, засыпка нагорных, водоподводящих, водоотводных каналов; высаживание или террасирование откосов; засыпка и планировка шахтных провалов;

- освобождение рекультивируемой поверхности от крупногабаритных обломков пород, производственных конструкций и строительного мусора с последующим их захоронением или организованным складированием;

- строительство подъездных путей к рекультивированным участкам, устройство въездов и дорог на них с

учетом прохода сельскохозяйственной, лесохозяйственной и другой техники;

– устройство, при необходимости, дренажной, водоотводящей оросительной сети и строительство других гидротехнических сооружений;

– устройство дна и бортов карьеров, оформление остаточных траншей, укрепление откосов;

– ликвидация или использование плотин, дамб, насыпей, засыпка техногенных озер и протоков, благоустройство русел рек;

– создание и улучшение структуры рекультивационного слоя, мелиорация токсичных пород и загрязненных почв, если невозможна их засыпка слоем потенциально плодородных пород;

– создание, при необходимости, экранирующего слоя;

– покрытие поверхности потенциально плодородными и (или) плодородными слоями почвы;

– противоэрозионная организация территории [4].

**Биологическая рекультивация (Биологический этап)** – этап рекультивации земель, в процессе которого осуществляется комплекс мероприятий (фитомелиоративных и агротехнических) по восстановлению плодородия нарушенных земель [6].

Обязательным элементом данного этапа является анализ вероятного последующего использования земель, и, в соответствии с результатами данного анализа, учет требований, предъявляемым к особенностям

рекультивации земель для того или иного типа пользования.

Обязательной стадией, в случае подготовки земель к сельскохозяйственному или лесохозяйственному использованию, является мелиоративная подготовка. Данная стадия включает в себя комплекс агротехнических и гидромелиоративных мероприятий, нацеленных на повышение урожайности сельскохозяйственных и лесных культур в результате повышения плодородия нарушенных почв [4, 5].

Продолжительность биологического этапа рекультивации может быть различна – от 1 года до 10 лет. Конкретная длительность зависит от многих причин: разновидность нарушенных земель; планируемый тип землепользования в будущем; специфика технологического этапа рекультивации; свойства наносимого плодородного слоя; свойства подстилающих горных пород; планируемый к выращиванию состав сельскохозяйственных культур.

Продолжительность биологического этапа рекультивации может быть заметно сокращена при наличии двух условий: нанесение значительного слоя плодородной почвы, а также наличие пород со сбалансированными физико-химическими свойствами в корнеобитаемом слое. Наоборот, к увеличению срока биологического этапа рекультивации ведет недостаточное применение плодородного слоя (табл. 1 / tabl. 1) [5].

Таблица 1

Длительность биологического этапа в зависимости от используемых технологий [5]

Table 1

Duration of the biological stage depending on the technologies [5]

| Почва, используемая как верхний слой // Soil used as top layer  | Толщина наносимого слоя, см // Thickness of the applied layer, cm | Тип пользования территории // Type of use of the territory | Длительность биологического этапа, лет // Duration of the biological stage, years |
|---|---|--|---|
| Плодородная почва // Fertile soil   | 30-35   | Пашня // Arable land                                       | 4-6   |
| Плодородная почва // Fertile soil   | 10-20   | Кормовые угодья // Feeding grounds                         | 5-6   |
| Лесовидные / покровные суглинки (потенциально-плодородная порода) // Forest-like / cover loams (potentially fertile rock) | 10-20   | –  | 6-8   |

Одними из способов биологической рекультивации являются биостимуляция и фиторемедиация. Так в статье Ayotamuno с коллегами показано, что на контрольном участке почвы через 9 недель эксперимента концентрация нефти снизилась на 9,8%, на участке подверженном биостимуляции – на 97,5%, на участке фиторемедиации – 78,3%, а на участке с сочетанием биостимуляции и фиторемедиации – 98,4% [31]. Полученные данные свидетельствуют об успешном применении биостимуляционных и фиторемедиационных технологий для восстановления нефтезагрязненной территории [8, 9, 11, 12, 19, 29]. При этом, использованные биотехнологии существенно снижают экономические затраты на восстановление нарушенных земель.

Биологическая рекультивация нарушенных земель должна не только повышать плодородие почв, но и

обеспечивать восстановление исходных биогеоценозов, способных воспроизводить все виды ресурсов. Для этого разработано значительное количество биопрепаратов, направленных на биодеструкцию нефти и продуктов ее переработки, загрязняющих природные среды в результате утечек, проливов, разного масштаба экологических катастроф.

По мнению большинства отечественных и зарубежных специалистов, наиболее полное восстановление может быть достигнуто обработкой почвы биопрепаратом на основе активных штаммов углеводородокисляющих микроорганизмов или посредством использования различных приёмов, направленных на стимулирование аборигенной микрофлоры почвы, которая способна усваивать нефть в качестве единственного источника углерода. Микробиологический способ биодegradации нефти и нефтепродуктов отличается неболь-

шими капиталовложениями, низким энергопотреблением, отсутствием вторичных отходов и экологической безопасностью [30]. Ежегодная потребность в биопрепаратах нефтедеструкторов оценивается в 100–1000 т.

Потенциальными потребителями биопрепаратов являются промышленные предприятия, нефтедобывающая и нефтеперерабатывающая промышленность, нефтеналивные и заправочные станции ГСМ, подразделения МЧС, автотранспортные предприятия и станции технического обслуживания, предприятия по транспортировке нефти и нефтепродуктов, морские и речные порты, фирмы, специализирующиеся на продаже недвижимости и земельных участков, городские и муниципальные службы и др.

В настоящее время на рынке представлена широкая номенклатура биопрепаратов на основе моно- и смешанных культур микроорганизмов для ликвидации загрязнений нефтью и нефтепродуктами. Наиболее известными зарубежными биопрепаратами являются «Микробар» и «Парабан» (США), представляющие собой порошкообразные вещества, хорошо растворимые в воде. Они разрушают углеводороды с длиной цепи C12 при pH 6,5–7,3; соленостью – до 1 % NaCl и температуре 10–35 °C [30].

В России для очистки нефтезагрязненных почв применяют бактериальные препараты: «Путидойл», «Деворойл», «Биоприн-Б», «Родотрин», «Экойл», «Универсал», «Сойлекс», «Фежел-био» и др. [7, 20]. Эти биопрепараты содержат в своем составе азотно-фосфорные удобрения, энзимы и микроорганизмы, выделенные из природных биоценозов, обладающие повышенной окислительной функцией, прошедшие адаптацию в естественных условиях [21].

Целью настоящего исследования являлось провести экспериментальное обоснование перспективности применения биоремедиационных подходов для очистки нефтезагрязненных почв *in situ* на территории Полазненского нефтяного месторождения.

#### Материалы и методика

Эксперименты *in situ* проводились на территории Полазненского месторождения в Добрянском районе Пермского края. Были заложены 4 варианта пробных площадок: 1) площадки без внесения бактериальных

культур и семян растений, 2) площадки с внесением бактериального препарата, 3) площадки, засеянные семенами растений, 4) площадки с внесением бактериального препарата и засевом растений. Все площадки были скальпированы от растений.

В качестве бактериального агента ремедиации использовали биопрепарат «БИОРЕК-РА» ТУ 9291-011-00495603-00 от 11.01.2016 г. В составе препарата присутствуют бактериальные штаммы *Pseudomonas fluorescens* ВКГ и *Azotobacter chroococcum* АИН. Данный препарат заявлен производителем как эффективный агент для ускоренной рекультивации и биоремедиации деградированных почвогрунтов в угольной, нефтяной, железорудной и золотодобывающей промышленности; повышения плодородия земель, создания и восстановления травяного покрова футбольных газонов, озеленения городских территорий и в качестве биоудобрения для садовых и комнатных растений. Разрешение на использование препарата в естественных условиях выдано ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае» от 07.10.2011 г. На каждую опытную площадку вносили 3 л препарата «БИОРЕК-РА».

В качестве фитокомпонента биоремедиации использовали семена люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.), овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.), райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.). На каждую площадку вносили по 4 г семян растений.

Отбор образцов почв проводили каждые 14 сут эксперимента согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017 Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа [2]. Образцы почв анализировали на содержание нефти согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 от 27.07.2005 г. «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ИК-спектрометрии» [14].

Для определения вероятного состава нефтяных углеводородов на исследуемой территории были взяты образцы нефти из боновых заграждений в районе нефтеловушки у д. Зуята (рис. 3 / fig. 3).

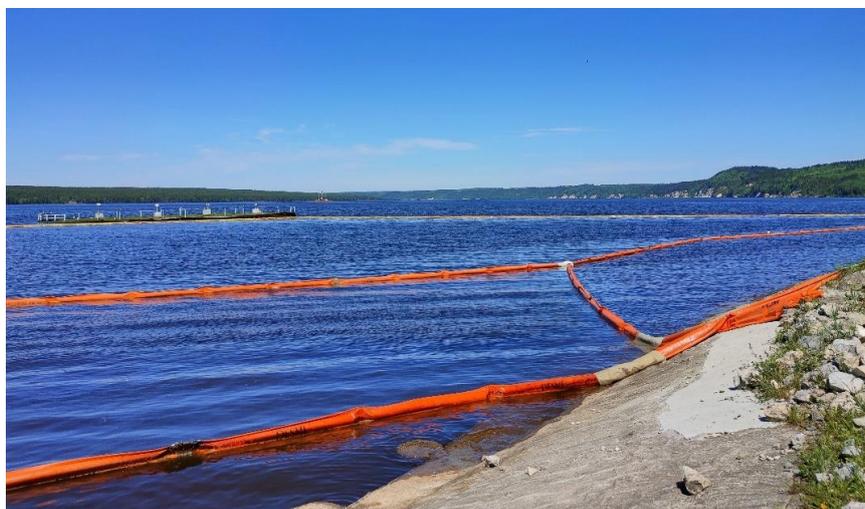


Рис. 3. Боновые заграждения  
Fig. 3. Oil booms

Общее проективное покрытие на экспериментальных площадках определяли по визуальной шкале с 10 градациями: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 %. Долю каждого вида высеванных растений определяли путем прямого подсчета. Длину надземной части растений определяли путем прямого замера выборочно у 20 растений на каждой площадке.

Все результаты обрабатывали статистически с использованием пакета программ MS Office и Statistica.

#### Результаты и их обсуждение

Эксперимент проводили в летне-осенний период в районе нефтеловушки у деревни Зуята Добрянского городского округа (рис. 4 / fig. 4).

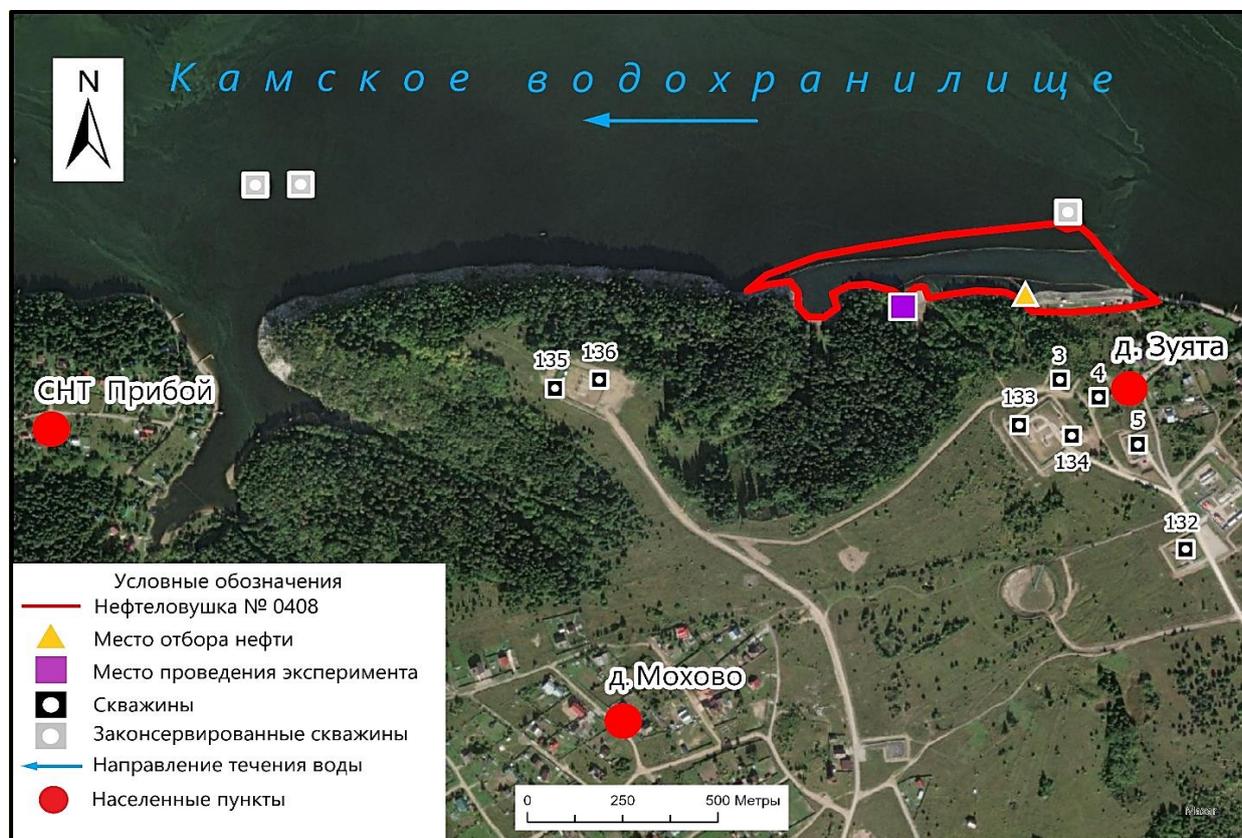


Рис. 4. Расположение экспериментального участка

Fig. 4. Location of the experimental site

На протяжении всего исследования фиксировали состояние растительности на экспериментальных и контрольном участках. Было отмечено, что не смотря на предварительное удаление с участков аборигенной растительности, проростки появлялись на площадке 2 (внесение бактерий) спустя месяц после скальпирования экспериментальной территории (табл. 2 / tabl. 2).

Оценка проективного покрытия показала, что высеv растений как в сочетании с бактериальным препаратом, так и без него, привел к активному росту вегетативной части, что было зафиксировано в результате оценки проективного покрытия (табл. 2 / tabl. 2, рис. 5 / fig. 1).

Таблица 2

Проективное покрытие растительности в ходе эксперимента, %

Table 2

Projective vegetation cover during the experiment, %

| Длительность эксперимента, сут. //<br>Experiment's duration of the, days | Экспериментальные площадки, № //<br>Experimental plots, No. |    |     |     |
|--|---|----|-----|-----|
|  | 1   | 2  | 3   | 4   |
| 0  | 0   | 0  | 0   | 0   |
| 14   | 0   | 0  | 10  | 20  |
| 28   | 0   | 0  | 40  | 50  |
| 42   | 0   | 10 | 100 | 100 |
| 56   | 0   | 20 | 100 | 100 |
| 70   | 0   | 30 | 100 | 100 |

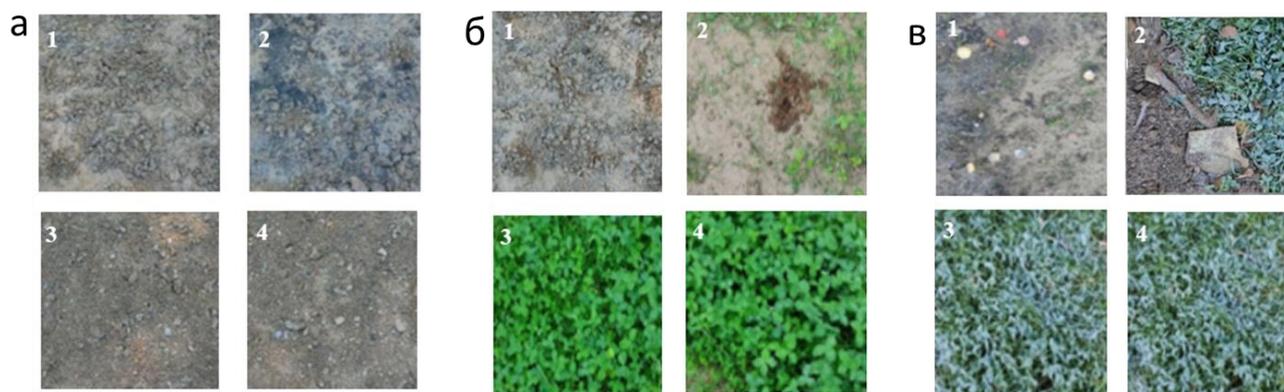


Рис. 5. Внешний вид экспериментальных площадок: а – начало эксперимента (0 сут.), б – середина эксперимента (42 сут.), в – конец эксперимента (70 сут.)

Fig. 5. External view of the experimental plots: a – the beginning of the experiment (0 days), b – the middle of the experiment (42 days), c – the end of the experiment (70 days)

Можно предположить, что внесение бактериального препарата в почву обеспечивает снижение негативной углеводородной нагрузки, благодаря чему на площадке 2 появляется растительность, а на контрольной площадке (площадка 1) проростков не было.

Измерение показателей надземной части растений люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.), овся-

ницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.), райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.) показал, что в первой половине эксперимента различия по высоте растений на 3 и 4 площадках практически отсутствовали, однако во второй половине эксперимента, достоверно выше были растения на 4 площадке (рис. 6 / fig. 6).

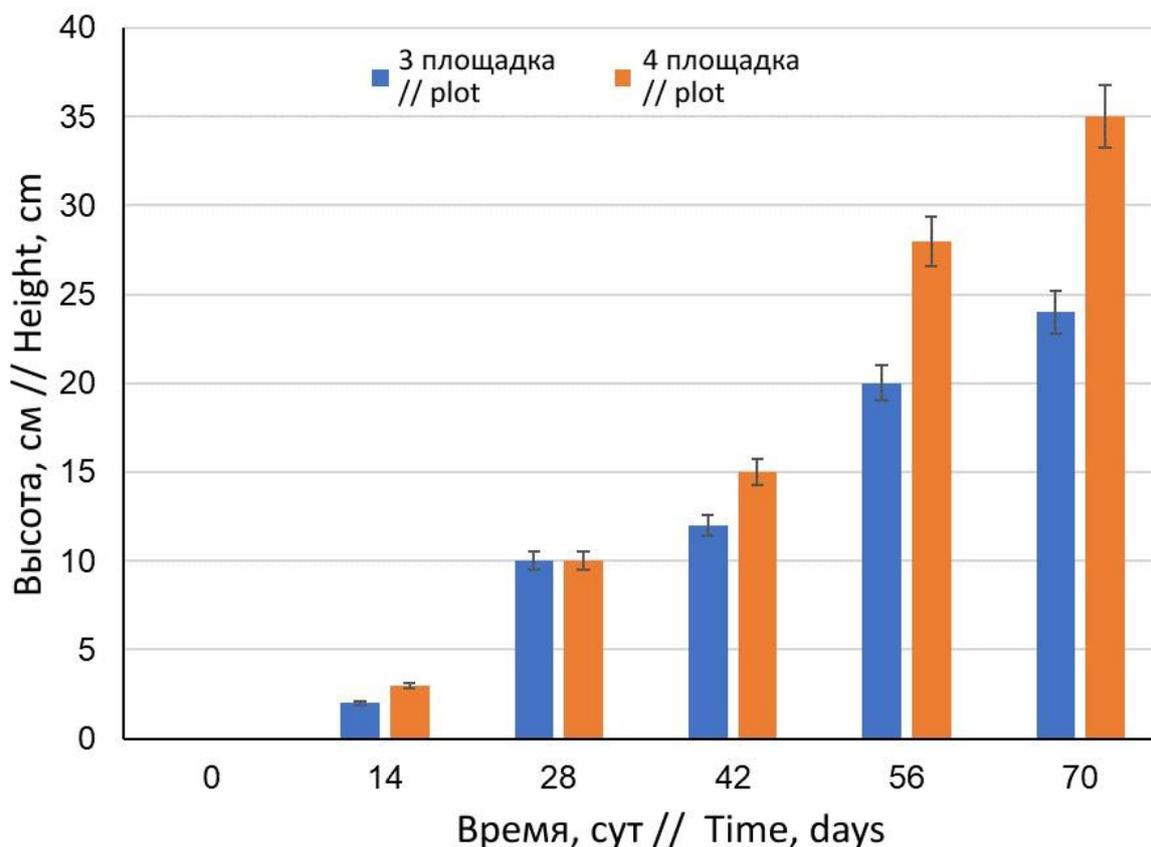


Рис. 6. Высота растений на площадках 3 (фиторемедиация) и 4 (биопрепарат + фиторемедиация)

Fig. 6. Plant height on sites 3 (phytoremediation) and 4 (biological product + phytoremediation)

Первыми проростки появились у люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.) и райграса пастбищного (*Lolium perenne* L.). В дальнейшем, к 28 суткам зафиксировано появление проростков овсяницы луговой

(*Festuca pratensis* Huds.). Соотношение растительных видов к концу эксперимента отличалось на площадках 3 и 4 (рис. 7 / fig. 7).

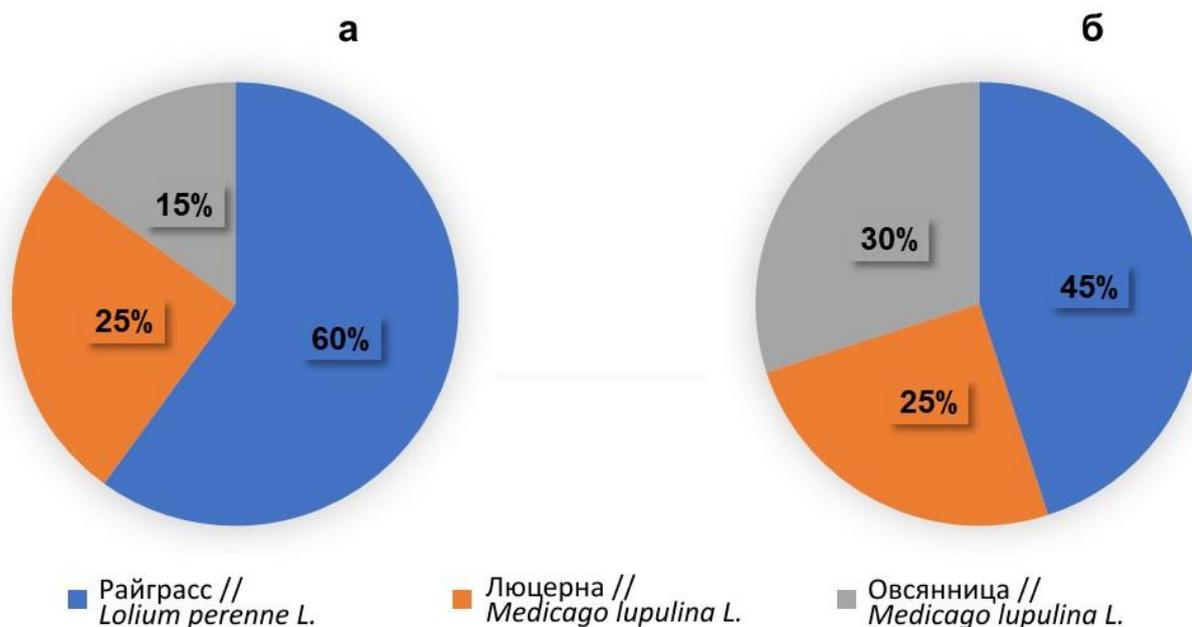


Рис. 7. Доля высеянных видов растений на 3 (фиторемедиация)(а) и 4 (биопрепарат + фиторемедиация) (б) типах площадок в конце эксперимента

Fig. 7. The proportion of plant species sown on 3 (phytoremediation) (a) and 4 (biological product + phytoremediation) (b) types of plots at the end of the experiment

На площадке 3 доминировал райграсс пастбищный (рис. 7а / fig. 7а). Люцерна хмелевидная и овсяница луговая значительно уступали райграсу по своей представленности на экспериментальном участке. Однако, на площадке 4 соотношение растительных видов было другим (рис. 7б / fig. 7б). В данном случае все три вида были в близком долевым соотношении. Следует отметить, что райграсс и на 4 площадке был представлен более обильно, чем остальные виды. Доля овсяницы на

площадке 4 была в два раза выше, чем на площадке 3, а у люцерны показатель не изменился. Вероятно, присутствие бактерий из биопрепарата в почве площадки 4 способствует снижению токсической нагрузки, что приводит к более эффективному развитию овсяницы луговой.

Проведен анализ концентрации углеводородов нефти на экспериментальных площадках (рис. 8 / fig. 8).

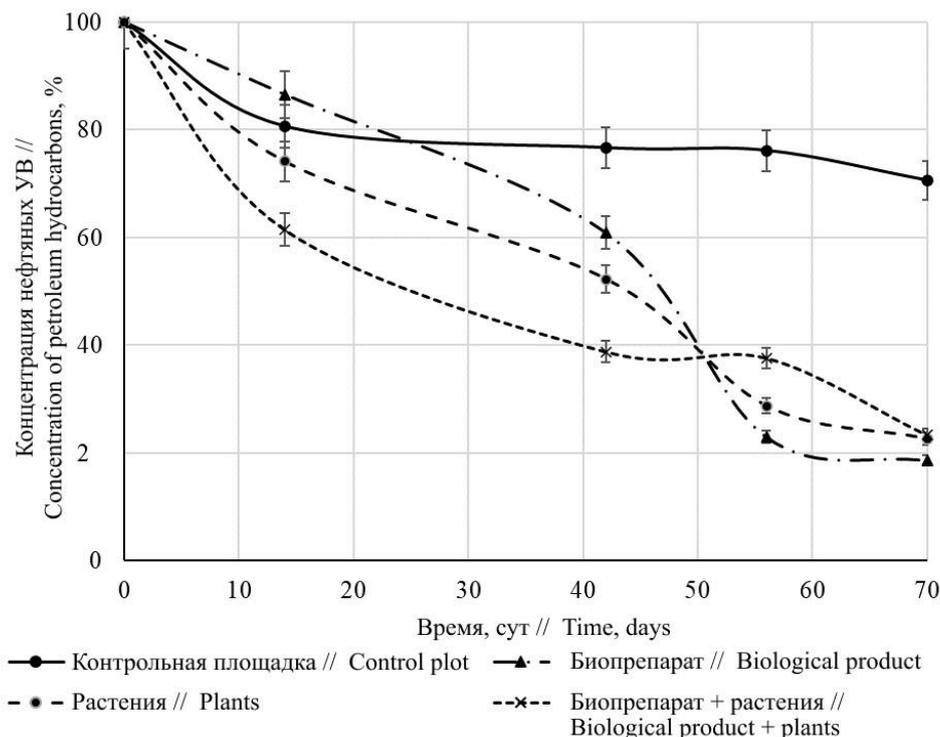


Рис. 8. Динамика изменения концентрации нефтяных углеводородов на экспериментальных площадках

Fig. 8. Dynamics of changes in the concentration of petroleum hydrocarbons at experimental plots

Во всех случаях отмечено снижение концентрации нефтяных углеводородов. Однако, на контрольной площадке снижение составило лишь 29,4% от начальной концентрации, тогда как на остальных площадках деструкции было подвергнуто 76,6-81,3% углеводородов нефти. Изменение концентрации загрязнителя описывается формулами:

$Y = 0,0003x^3 - 0,0368x^2 + 0,0788x + 98,304$ ;  $R^2 = 0,9681$  – площадка 2 (биопрепарат)

$Y = -0,0001x^3 + 0,0187x^2 + 1,806x + 98,884$ ;  $R^2 = 0,982$  – площадка 3 (фиторемедиация)

$Y = 0,0007x^3 + 0,0855x^2 - 3,8741x + 100,21$ ;  $R^2 = 0,999$  – площадка 4 (био + фиторемедиация).

Все значение  $R^2$  близки к единице, что позволяет говорить о высокой степени достоверности описания процессов деструкции нефтяных углеводородов на исследуемых площадках данными уравнениями.

Следует отметить, что на площадках, где использован бактериологический препарат, концентрация загрязнителя была снижена до уровня ПДК через 14 сут. эксперимента, а на площадке, где были использованы только растения – через 28 сут.

Таким образом установлено, что все использованные в работе варианты восстановления нефтезагрязненной почвы показали высокую эффективность, однако сочетанное использование бактериальных препаратов и растений в динамике дает более быстрый результат.

#### Сведения об авторском вкладе

Д.О. Егорова – постановка задачи исследования, формулировка идеи статьи, текст статьи.

Е.В. Ташкинов – выполнение полевых работ, отбора образцов для анализа.

#### Contribution of the authors

D.O. Egorova – formulation of research tasks, development of article idea, writing the article.

E.V. Tashkinov – conducting fieldwork, sampling for analysis.

#### Список источников

1. *Ахмадиев М.В., Рудакова Л.В.* Анализ методов восстановления нефтезагрязнённых земель // II Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2008. Т. 1, № 6. С. 16-25.

2. ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа».

3. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» [Электронный ресурс]. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения: 11.03.22).

4. Государственный стандарт РФ «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязненных нефтью и нефтепродуктами». ГОСТ Р 57447-2017. Введ. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017.

5. Государственный стандарт РФ «Наилучшие доступные технологии. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков. Восстановление биологического разнообразия». ГОСТ Р 57446-2017. Введ. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017.

6. Государственный стандарт РФ «Охрана окружающей среды. Рекультивация нарушенных и нефтезагрязненных земель. Термины и определения». ГОСТ Р 59070-2020. Введ. 2021-04-01 – АО «Кодекс», 2021.

7. *Дядечко В.Н., Толстокорова Л.Е., Морозова Т.Н.* Патент 1076446 РФ. ШТАММ *Pseudomonas putida* 36, используемый для очистки воды и почвы от нефти и нефтепродуктов. БИ. № 6, 1984.

8. *Журавлева В.В.* Использование рекультивационных смесей для утилизации отходов нефтедобычи // Бюллетень науки и практики. Нижневартовск, 2017. С. 130-139.

9. *Кузнецов Ф.М., Иларионов С.А., Середин В.В., Иларионова С.А.* Рекультивация нефтезагрязненных почв // Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 2000. 105 с.

10. *Оборин А.А.* Самоочищение и рекультивация нефтезагрязнённых почв Предуралья и Западной Сибири // Восстановление нефтезагрязнённых почвенных экосистем. М.: Наука, 1988. С. 140-158.

11. *Освальд Е.С., Петровский В.М., Назаров В.П.* Проблемы ликвидации ЧС, связанные с разливом нефти и нефтепродуктов // Гражданская оборона на страже мира и безопасности. Материалы V Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны: в 4 ч. Москва, 2021. С. 45-55.

12. *Островский Ю.В., Заборцев Г.М., Черноок В.А.* Комплексная рекультивация территории Павельцевской нефтебазы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Томск, 2019. С. 210-219.

<https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2141>

13. *Паришина Н.В., Березин А.Е.* Щадящие методы рекультивации земель на заболоченных территориях // Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН. Ответственный редактор А.И. Сысо. Томск, 2018. С. 303-307.

14. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 от 10.11.1998 г. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органогенных, органо-минеральных почвах и донных отложениях методом ик-спектрометрии.

15. *Поварова Л.В., Кусов Г.В.* Нормативно-техническое регулирование экологической безопасности в нефтегазовой отрасли // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник), Краснодар, 2018. № 4. С. 195-216.

16. Постановление Правительства РФ № 240 «О порядке организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов на территории Российской Федерации». Введ. 2002–04–15 – АО «Кодекс», 2002.

17. Постановление Правительства РФ № 2451 «Об утверждении Правил организации мероприятий по предупреждению и ликвидации разливов нефти и

нефтепродуктов на территории Российской Федерации, за исключением внутренних морских вод Российской Федерации и территориального моря Российской Федерации, а также о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». Введ. 2020–12–31 – АО «Кодекс», 2020.

18. Постановление Правительства РФ № 477 «Об осуществлении государственного мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды». Введ. 2013–06–06 – АО «Кодекс», 2013.

19. *Равзутдинов А.Р., Гилязов М.Ю., Кушамбердиева С.Ж.* Действие агрохимических и агротехнических приемов рекультивации нефтезагрязненной почвы на урожайность ярового рапса // Журнал: Зерновое хозяйство России. Казань, 2017. 2(50). С. 22–26.

20. *Сидоров Д.Г.* Микробиологическая деструкция мазута в почве при использовании биопрепарата «Деворойл» // Прикладная биохимия и микробиология. 1998. Т. 34, № 3. С. 281–286.

21. *Сопрунова О.Б., Дзержинская И.С., Еремеева С.В.* О перспективах использования новых типов биопрепаратов для рекультивации нефтезагрязненных почв // Научно-практический семинар «Проблемы экологической безопасности Нижнего Поволжья в связи с разработкой и эксплуатацией нефтегазовых месторождений с высоким содержанием сероводорода», Астрахань. 2000. С. 125–127.

22. Справки «О состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы по регионам России в 2019 году» (ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского) [Электронный ресурс]. URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/gisatlas/msb/> (дата обращения: 11.03.22).

23. *Фадеева Н. П., Бурлин Ю. К.* Нефть // Большая российская энциклопедия. Т. 22. М., 2013. С. 553–558.

24. Федеральный закон № 7–ФЗ «Об охране окружающей среды». Введ. 2002–01–10 – АО «Кодекс», 2002.

25. Фракционный и химический состав нефти // Электронный учебный курс Самарского государственного экономического университета «Добыча и переработка нефти» [Электронный ресурс]. URL: <https://lms2.sseu.ru/mod/book/view.php?id=62117> (дата обращения: 14.04.22).

26. *Хазиев Ф.Х.* Изменение биохимических процессов в почвах при нефтяном загрязнении и активация разложения нефти // Журнал: Агрохимия. 1981. С.:102–111.

27. *Чижов Б. Е.* Рекультивация и ремедиация в лесах Западной Сибири: моногр. / Б.Е. Чижов, О.А. Кулясова. Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 222 с. + 24 с. цв. вкл.

28. *Шамраев А.В., Шорина Т.С.* Влияние нефти и нефтепродуктов на различные компоненты окружающей среды // Вестник Оренбургского государственного университета. Оренбург, 2009. С. 642–645.

29. *Экзарьян В.Н., Рукавицын В.В.* Разработка критериев оценки сохранности окружающей среды при нефтедобыче // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. М., 2016. С. 70–74.

30. *Ягафарова Г.Г.* Экологическая биотехнология в нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. 214 с.

31. *Ayotamuno J., Kogbara R., Agoro O.* Biostimulation supplemented with phytoremediation in the reclamation of a petroleum contaminated soil // World J Microbiol Biotechnol. 2009. Vol. 25. P. 1567–1572. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0045-z>

32. *Nallur V., McClung M., Moran M.* Potential for Reclamation of Abandoned Gas Wells to Restore Ecosystem Services in the Fayetteville Shale of Arkansas // Environmental Management. 2020. Vol. 66. P. 180–190. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01307-3>

## References

1. Akhmediyev, M. and Rudakova, L., 2008. Analiz metodov vosstanovleniya neftezagryaznennykh zemel' [Analysis of methods for restoring oil-contaminated lands]. II Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. *Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 1(6). pp. 16–25. (in Russian)

2. GOST 17.4.4.02-2017 Mezhsudarstvennyy standart. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [Interstate standard. Protection of Nature. Soils. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis] (in Russian)

3. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispol'zovanii mineral'no-syr'yevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2019 godu» [On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2019] (elektronnyy resurs). Available from:

[https://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispol'zovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostyanii\\_i\\_ispol'zovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispol'zovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispol'zovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) [Accessed 11th March 2022].

4. Gosudarstvennyy standart RF Nailuchshiyе dostupnyye tekhnologii. Rekul'tivatsiya zemel' i zemel'nykh uchastkov, zagryaznennykh nef'tyu i nefteproduktami [Best available technologies. Reclamation of lands and land plots contaminated with oil and petroleum products] GOST R 57447-2017. Vved. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017. (in Russian)

5. Gosudarstvennyy standart RF Nailuchshiyе dostupnyye tekhnologii. Rekul'tivatsiya narushennykh zemel' i zemel'nykh uchastkov. Vosstanovleniye biologicheskogo raznoobraziya [Best available technologies. Reclamation of disturbed lands and land plots. Restoring biological diversity]. GOST R 57446-2017. Vved. 2017-12-01 – АО «Кодекс», 2017. (in Russian)

6. Gosudarstvennyy standart RF Okhrana okruzhayushchey sredy. Rekul'tivatsiya narushennykh i neftezagryaznennykh zemel'. Terminy i opredeleniya [Environmental protection. Reclamation of disturbed and oil-contaminated lands. Terms and Definitions]. GOST R 59070-2020. Vved. 2021-04-01 – АО «Кодекс», 2021. (in Russian)

7. Dyadechko, V., Tolstokorova, L. and Morozova, T., 1984. Patent 1076446 RF. SHTAMM *Pseudomonas putida* 36, ispol'zuyemyy dlya ochistki vody i pochvy ot

nefti i nefteproduktov. [*Pseudomonas putida* STRAIN 36, used to purify water and soil from oil and petroleum products]. BI. № 6. (in Russian)

8. Zhuravleva, V., 2017. Ispol'zovaniye reku-l'tivatsionnykh smesey dlya utilizatsii otkhodov nefte-doby-chi [The use of reclamation mixtures for the disposal of oil production waste]. *Zhurnal: Byulleten' nauki i praktiki. Nizhnevartovsk*, pp. 130-139. (in Russian)

9. Kuznetsov, F., Ilarionov, S., Seredin, V. and Ilarionova, S., 2000. Rekul'tivatsiya neftezagryaznennykh pochv [Recultivation of oil-contaminated soils]. *Perm. gos. tekhn. un-t. Perm*. 105 p. (in Russian)

10. Oborin, A., 1988. Samoochishcheniye i reku-l'tivatsiya neftezagryaznennykh pochv Predural'ya i Zapadnoy Sibiri [Self-purification and reclamation of oil-contaminated soils in the Cis-Urals and Western Siberia]. *Vosstanovleniye neftezagryaznennykh pochvennykh ekosistem*. Moscow, Nauka, pp. 140-158. (in Russian)

11. Osva'd, Ye., Petrovskiy, V., Nazarov, V., 2021. *Problemy likvidatsii CHS, svyazannyye s razlivom nefti i nefteproduktov [Problems of emergency response related to oil and petroleum product spills]. Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony: v 4 ch. Moscow, pp. 45-55. (in Russian)*

12. Ostrovskiy, Yu., Zabortsev, G. and Chernook, V., 2019. Kompleksnaya rekul'tivatsiya territorii Pavel'tsevskoy neftebazy [Comprehensive reclamation of the territory of the Pavel'tsevskaya oil depot]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. Tomsk, pp. 210-219. (in Russian) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/6/2141>

13. Parshina, N., Berezin, A., 2018. *Shchadashchiye metody rekul'tivatsii zemel' na zabolochennykh territoriyakh [Sensible methods of land reclamation in wetlands]. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 50-letiyu Instituta pochvovedeniya i agrokhimii SO RAN. Otvetstvennyy redaktor A.I. Syso. Tomsk, pp. 303-307. (in Russian)*

14. PND F 16.1:2.2.22-98 ot 10.11.1998 g. Kolichestvennyy khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organo-mineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom ik-spektrometrii. [Quantitative chemical analysis of soils. Methodology for measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organomineral soils and bottom sediments using the IR spectrometry method] (in Russian)

15. Povarova, L., Kusov, G., 2018. Normativno-tekhnicheskoye regulirovaniye ekologicheskoy bezopasnosti v neftegazovoy otrasli [Regulatory and technical regulation of environmental safety in the oil and gas industry]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (politekhnicheskiiy vestnik)*, Krasnodar, (4), pp. 195-216. (in Russian)

16. Postanovleniye Pravitel'stva RF № 240 O por-yadke organizatsii meropriyatii po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefti i nefteproduktov na territorii Rossiyskoy Federatsii. [On the procedure for organizing measures to prevent and eliminate oil and petroleum product spills on the territory of the Russian Federation] Enter. 2002-04-15 – AO «Kodeks», 2002. (in Russian)

17. Postanovleniye Pravitel'stva RF № 2451 Ob ut-verzhdanii Pravil organizatsii meropriyatii po preduprezhdeniyu i likvidatsii razlivov nefti i nefteproduktov na territorii Rossiyskoy Federatsii, za iskluyucheniye vnutrennikh morskikh vod Rossiyskoy Federatsii i territorial'nogo morya Rossiyskoy Federatsii, a takzhe o priznanii utrativshimi silu nekotorykh aktov Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii [On approval of the Rules for organizing measures for the prevention and response to oil and petroleum product spills on the territory of the Russian Federation, with the exception of the internal sea waters of the Russian Federation and the territorial sea of the Russian Federation, as well as on the invalidation of certain acts of the Government of the Russian Federation] Enter. 2020-12-31 – AO «Kodeks», 2020. (in Russian)

18. Postanovleniye Pravitel'stva RF № 477 Ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoringa sosto-yaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy [On the implementation of state monitoring of the state and pollution of the environment]. Enter. 2013-06-06 – AO «Kodeks», 2013.

19. Ravzutdinov, A., Gilyazov M. and Kuzhamb-diyeva, S., 2017. Deystviye agrokhimicheskikh i agrotekhnicheskikh priyemov reku-l'tivatsii neftezagryaznennykh pochvy na urozhaynost' yarovogo rapsa [The effect of agrochemical and agrotechnical methods of reclamation of oil-contaminated soil on the yield of spring rapeseed]. *Zernovoye khozyaystvo Rossii*. Kazan, 2(50), pp. 22-26. (in Russian)

20. Sidorov, D., 1998. Mikrobiologicheskaya destruktivnaya mazuta v pochve pri ispol'zovanii biopreparata «Devoroyl» [Microbiological destruction of fuel oil in soil using the biological product “Devoroil”]. *Prilkladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 34(3), pp. 281-286. (in Russian)

21. Soprunova, O., Dzerzhinskaya, I., Yeremeyeva, S., 2000. O perspektivakh ispol'zovaniya novykh tipov biopreparatov dlya reku-l'tivatsii neftezagryaznennykh pochv [On the prospects of using new types of biological products for the remediation of oil-contaminated soils]. Nauchno-prakticheskiiy seminar “Problemy ekologicheskoy bezopasnosti Nizhnego Povolzh'ya v svyazi s razrabotkoy i ekspluatatsiyey neftegazovykh mestorozhdeniy s vysokim soderzhaniyem serovodoroda”, Astrakhan, pp. 125-127. (in Russian)

22. Spravki “O sostoyanii i perspektivakh ispol'zovaniya mineral'no-syr'yevo-y bazy po regionam Rossii v 2019 godu” (FSUE A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute) [On the state and prospects for the use of the mineral resource base in the regions of Russia in 2019]. Available from: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/gisatlas/msb/> [Accessed 11th March 2022].

23. Fadeyeva, N. and Burlin, Yu., 2013. Neft' [Oil]. *Bol'shaya rossiyskaya entsiklopediya*. 22. Moscow, pp. 553-558. (in Russian)

24. Federal'nyy zakon № 7-FZ «Ob okhrane okruzhayushchey sredy». [On Environmental Protection] Enter. 2002-01-10 – AO «Kodeks», 2002. (in Russian)

25. Fraktsionnyy i khimicheskiy sostav nefti [Fractional and chemical composition of oil]. Elektronnyy uchebnyy kurs Samarskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta «Dobycha i pererabotka nefti». Available from:

<https://lms2.sseu.ru/mod/book/view.php?id=62117> [Accessed 14th April 2022].

26. Khaziyev, F., 1981. *Izmeneniye biokhimicheskikh protsessov v pochvakh pri neftyanom zagryaznenii i aktivatsiya razlozheniya nefiti* [Changes in biochemical processes in soils during oil pollution and activation of oil decomposition]. *Agrokimiya*, pp.:102-111. (in Russian)

27. Chizhov, B., 2018. *Rekul'tivatsiya i remediatsiya v lesakh Zapadnoy Sibiri* [Recultivation and remediation in the forests of Western Siberia: monograph]. Pushkino: VNIILM, 222 p. (in Russian)

28. Shamrayev, A. and Shorina, T., 2009. *Vliyaniye nefiti i nefteproduktov na razlichnyye komponenty okruzhayushchey sredy* [The influence of oil and petroleum products on various components of the environment]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. Orenburg, pp. 642-645. (in Russian)

29. Ekzar'yan, V. and Rukavitsyn, V., 2016. *Razrabotka kriteriyev otsenki sokhrannosti okruzhayushchey*

*sredy pri neftedobyche* [Development of criteria for assessing the safety of the environment during oil production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*. Moscow, pp. 70-74. (in Russian)

30. Yagafarova, G., 2001. *Ekologicheskaya biotekhnologiya v neftegazodobyvayushchey i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti* [Environmental biotechnology in the oil and gas production and oil refining industries] Ufa, Izd-vo UGNTU, 214 p. (in Russian)

31. Ayotamuno, J., Kogbara, R. and Agoro, O., 2009. Biostimulation supplemented with phytoremediation in the reclamation of a petroleum contaminated soil. *World J Microbiol Biotechnol*, 25, pp. 1567-1572. <https://doi.org/10.1007/s11274-009-0045-z>

32. Nallur V., McClung M., Moran M., 2020. Potential for Reclamation of Abandoned Gas Wells to Restore Ecosystem Services in the Fayetteville Shale of Arkansas. *Environmental Management*, 66, pp. 180-190. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01307-3>

Статья поступила в редакцию 08.05.2024; одобрена после рецензирования 13.05.2024; принята к публикации 20.05.2024.

The article was submitted 08.05.2024; approved after reviewing 13.05.2024; accepted for publication 20.05.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Краткое сообщение

УДК 502.3

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-64-70>

## Анализ отчетности по озоноразрушающим веществам в регионах РФ за 2018-2024 гг.

Надежда Львовна Рачёва<sup>1</sup>, Максим Сергеевич Беленко<sup>2</sup><sup>1</sup> Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем, Пермь, Россия<sup>1,2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия<sup>1</sup> [racheva@ecologyperm.ru](mailto:racheva@ecologyperm.ru)<sup>2</sup> [belenko.mc@mail.ru](mailto:belenko.mc@mail.ru)

**Аннотация.** Разрушение озонового слоя атмосферы является одной из глобальных экологических проблем, для решения которой в 1987 г. был принят Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой. Монреальский протокол призывает к поэтапному отказу от использования веществ, разрушающих озоновый слой. Для реализации требований Монреальского протокола на территории Российской Федерации организован государственный учет обращения озоноразрушающих веществ. Порядок государственного учета обращения озоноразрушающих веществ и формы ежегодной отчетности установлены Правительством РФ. В данном исследовании за период 2018-2022 гг. проанализированы ежегодные отчеты об обращении с озоноразрушающими веществами, предоставленные юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями в адрес Минприроды России и проведена оценка динамики предоставления отчетности в разрезе субъектов РФ. Выявлено, что доля субъектов РФ, в которых организации не предоставляют в Минприроды России отчетность по обращению с озоноразрушающими веществами составляет в среднем 36 %, несмотря на то что обращение с озоноразрушающими веществами в данных субъектах имеет место. Установлено, что в течении пяти лет только в единичных субъектах РФ отчетность по обращению с озоноразрушающими веществами подавали более 50 организаций. В основном же организации в субъектах РФ либо вообще не отчитываются, либо отчитываются, но в небольшом количестве. По результатам работы можно сделать вывод, что в настоящее время отчетность юридических лиц и индивидуальных предпринимателей об обращении с озоноразрушающими веществами носит формальный характер и не отражает реальной картины об объемах обращения озоноразрушающих веществ на территории РФ, и, следовательно, государственный учет обращения озоноразрушающих веществ требует улучшения.

**Ключевые слова:** озоноразрушающие вещества, Монреальский протокол, государственный учет

**Для цитирования:** Рачёва Н.Л., Беленко М.С. Анализ отчетности по озоноразрушающим веществам в регионах РФ за 2018-2024 гг. // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 1. С. 64-70. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-64-70>

## SECTION 2. POLLUTION

Short Communications Article

## Analysis of ozone-depleting substances reporting in Russian regions for 2018-2024

Nadezhda L. Racheva<sup>1</sup>, Maxim S. Belenko<sup>2</sup><sup>1</sup> Applied Ecology, Ural Environmental Research Institute, Perm, Russia<sup>1,2</sup> Perm State University, Perm, Russia<sup>1</sup> [racheva@ecologyperm.ru](mailto:racheva@ecologyperm.ru)<sup>2</sup> [belenko.mc@mail.ru](mailto:belenko.mc@mail.ru)

**Abstract.** Depletion of the ozone layer of the atmosphere is one of the global environmental problems, to address which the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer was adopted in 1987. The Montreal Protocol calls for a phase-out of the use of substances that deplete the ozone layer. To implement the requirements of the Montreal Protocol, state registration of the circulation of ozone-depleting substances has been organized on the territory of the Russian Federation. The procedure for state accounting of the circulation of ozone-depleting substances and the forms of annual reporting are established by the Russian Government. In this study, for the period 2018-2022 analyzed annual reports on the management of ozone-depleting substances provided by legal entities and individual entrepreneurs to the Russian Ministry of Natural Resources and assessed the dynamics of reporting provided by the Russian regions. It was revealed that the share of the Russian regions, organizations from which do not submit reports on the management of

ozone-depleting substances to the Russian Ministry of Natural Resources is on average 36%, despite the fact that the management of ozone-depleting substances in these regions existed. It was established that over the course of five years, more than 50 organizations submitted reports on the management of ozone-depleting substances in just a few the Russian regions. Basically, organizations in the Russian regions either do not report at all, or report, but in small numbers. Based on the results of the work, we can conclude that currently the reporting of legal entities and individual entrepreneurs on the handling of ozone-depleting substances is of a formal nature and does not reflect the real picture of the volume of circulation of ozone-depleting substances in Russia, and therefore state accounting of the circulation of ozone-depleting substances requires improvement.

**Keywords:** ozone-depleting substances, Montreal Protocol, state accounting

**For citation:** Racheva, N., Belenko, M., 2024. Analysis of ozone-depleting substances reporting in Russian regions for 2018-2024. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(1). pp. 64-70. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-1-64-70> (in Russian)

## Введение

Озоновый слой – это защитный зонтик планеты, который является щитом для всего живого от опасного ультрафиолетового излучения и позволяет избежать губительного воздействия солнечных лучей. Озоновый слой был открыт в 1913 г. французскими физиками Шарлем Фабри и Анри Буиссоном, а в середине 1970-х гг. ученые осознали, что озоновому слою угрожает скопление некоторых газов в атмосфере. В середине 80-х гг. прошлого века, ученые обнаружили «дыру» в озоновом слое над Антарктидой и мировым сообществом было принято решение о разработке специальных мер по защите озонового слоя [6].

Так, в 1985 г. была принята Венская конвенция об охране озонового слоя [1], а в 1987 г. был принят Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой [2].

По состоянию на сентябрь 2021 г. первоначальный текст Монреальского протокола ратифицирован 198 странами.

Российская Федерация, как правопреемница СССР, подписавшего протокол 29 декабря 1987 г. и ратифицировавшего 10 ноября 1988 г., является Стороной Монреальского протокола с 31 декабря 1991 г. [3].

Участие Российской Федерации в международных соглашениях, связанных с проблемой разрушения озонового слоя озоноразрушающими веществами (далее ОРВ), и наличие требований отечественного законодательства по государственному регулированию обращения с ОРВ определяют важность и актуальность рассматриваемой темы.

В соответствии со статьей 4 Федерального закона «Об охране окружающей среды» [5] «Объектами охраны окружающей среды от загрязнения, истощения, деградации, порчи, уничтожения и иного негативного воздействия хозяйственной и (или) иной деятельности являются компоненты природной среды, природные объекты и природные комплексы». Одним из компонентов природной среды, согласно статье 1 Федерального закона «Об охране окружающей среды» [5] является озоновый слой атмосферы.

Озоновый слой способен разрушать озоноразрушающие вещества – химические соединения (фтор-, хлор- или бромсодержащие производные насыщенных углеводородов) и озоноразрушающая химическая продукция.

Озоноразрушающие вещества подлежат контролю в соответствии с Монреальским протоколом по веществам, разрушающим озоновый слой [2], поэтому статьей 69.1 Федерального закона от 10.01.2002 № 7-ФЗ

«Об охране окружающей среды» [5] предусмотрено, что государственный учет обращения озоноразрушающих веществ осуществляется уполномоченным федеральным органом исполнительной власти в целях установления Правительством Российской Федерации допустимого объема производства и потребления озоноразрушающих веществ в Российской Федерации исходя из обязательств Российской Федерации, вытекающих из международных договоров Российской Федерации.

Базовым документом в Российской Федерации, который позволяет реализовывать международные требования по обращению с ОРВ является постановление Правительства Российской Федерации от 18.02.2022 г. № 206 «О мерах государственного регулирования потребления и обращения веществ, разрушающих озоновый слой» [4].

Вышеуказанное постановление Правительства Российской Федерации [4] устанавливает, что Минприроды России является ведущим органом по обращению с ОРВ и реализовывает государственный учет обращения озоноразрушающих веществ на территории Российской Федерации. В соответствии с пунктом 3 [4] Минприроды России также осуществляет ежегодный расчет допустимого объема производства озоноразрушающих веществ в Российской Федерации, за исключением регулируемых веществ списка F, на основании предложений, полученных от Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

В целях государственного учета обращения озоноразрушающих веществ юридические лица и индивидуальные предприниматели, осуществляющие производство, использование, хранение, рекуперацию, восстановление, рециркуляцию (рециркулирование) и уничтожение озоноразрушающих веществ на территории Российской Федерации должны вести учет произведенных, использованных, находящихся на хранении, рекуперированных, восстановленных, рециркулированных и уничтоженных озоноразрушающих веществ. Они должны ежегодно представлять в Минприроды России отчетность за прошедший год о произведенных, использованных, находящихся на хранении, рекуперированных, восстановленных, рециркулированных и уничтоженных озоноразрушающих веществах по следующим формам: «Отчетность о произведенных, использованных, находящихся на хранении, рекуперированных, восстановленных, рециркулированных и уничтоженных веществах, разрушающих озоновый слой, обращение которых подлежит государственному регулированию», «I. Производство ОРВ, в том числе

ГФУ, в 20\_\_ году», «II. Рекуперация, восстановление и уничтожение ОРВ, в том числе ГФУ, в 20\_\_ году», «III. Хранение ОРВ и ГФУ в 20\_\_ году», «IV. Рециркуляция (рециркулирование) ОРВ и ГФУ в 20\_\_ году», «V. Использование ОРВ и ГФУ в 20\_\_ году», которые представлены в приложении 1 к постановлению Правительства Российской Федерации формам [4].

Целью данного исследования является оценка динамики предоставления отчетности юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями об обращении с ОРВ в разрезе субъектов РФ за период 2018–2022 гг.

#### Материал и методы исследования

В связи с масштабностью проблемы разрушения озонового слоя на международном уровне вопрос государственного учета обращения озоноразрушающих веществ на территории Российской Федерации является актуальным.

В настоящей статье проанализированы данные из форм отчетности о произведенных, использованных, находящихся на хранении, рекуперированных, восстановленных, рециркулированных и уничтоженных веществах, разрушающих озоновый слой, обращение которых подлежит государственному регулированию, предоставленных юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями в адрес Минприроды России в период 2018–2022 гг. (всего проанализированы 2036 отчетов) и проведена оценка динамики предоставленной отчетности об обращении с ОРВ юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями в разрезе субъектов Российской Федерации за период 2018–2022 гг.

С помощью метода сравнительного анализа проведена оценка регулярности подачи отчетности об обращении с ОРВ организациями (юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями) на территории субъектов Российской Федерации за период 2018–2022 гг.

С целью визуализации динамики подачи отчетности организациями (юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями) в пределах террито-

рии Российской Федерации в период 2018–2022 гг. построены картограмма и картодиаграмма в программе ArcGIS.

#### Результаты и обсуждение

Согласно Федеральному закону № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [5] под обращением понимается достаточно большой спектр действий с озоноразрушающими веществами – производство, использование, транспортировка, хранение, рекуперация, восстановление, рециркуляция (рециклирование) и уничтожение озоноразрушающих веществ, ввоз в Российскую Федерацию и вывоз из Российской Федерации озоноразрушающих веществ [5].

В Российской Федерации под озоноразрушающими веществами понимаются химические соединения – фтор-, хлор- или бромсодержащие производные насыщенных углеводородов, способные разрушать озоновый слой. В настоящее время насчитывается 114 озоноразрушающих веществ, которые подлежат контролю в соответствии с Монреальским протоколом и поправками к нему.

Все 114 ОРВ с разной интенсивностью воздействуют на озоновый слой, поэтому некоторые из них полностью запрещены к применению, а для других допускается ограниченное использование.

В Российской Федерации начиная с 2015 г. в Минприроды России ежегодно от юридических лиц и индивидуальных предпринимателей поступают отчеты об обращении с ОРВ от юридических лиц (далее ЮЛ) и индивидуальных предпринимателей (далее ИП).

В настоящей работе с целью оценки динамики предоставления отчетности об обращении с ОРВ первоначально была проведена систематизация данных из 2036 отчетов путем формирования единой базы данных в Excel. Затем был проведен сравнительный анализ данных представленных в отчетах об обращении с ОРВ.

В результате анализа систематизированных данных из 2036 отчетов об обращении с ОРВ получены следующие результаты (таблица 1-2 / table 1-2)

Таблица 1

#### Количество организаций, отчитавшихся за период 2018–2022 гг.

Table 1

#### Number of organizations reporting for the period 2018–2022

| Отчетный год // Reporting year | Количество организаций, которые отчитались // Number of organizations that reported | Количество ЮЛ из числа отчитавшихся организаций // Number of legal entities among reporting organizations | Количество ИП из числа отчитавшихся организаций // Number of individual entrepreneurs among reporting organizations |
|--------------------------------|---|---|---|
| 2018                           | 408   | 393   | 15  |
| 2019                           | 472   | 461   | 11  |
| 2020                           | 613   | 597   | 16  |
| 2021                           | 428   | 416   | 12  |
| 2022                           | 115   | 114   | 1   |

Таблица 2

## Обращение с ОРВ в РФ за период 2018–2022 гг.

Table 2

## ODS management in Russia in 2018–2022

| Вид обращения<br>с ОРВ // Type of ODS management                       | Количество организаций // Number of organizations |      |      |      |      |
|--|---|------|------|------|------|
|  | 2018  | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
| Рекуперация и восстановление // Recovery and restoration               | 4   | 8    | 3    | 1    | 1    |
| Хранение // Storage  | 55  | 62   | 74   | 47   | 16   |
| Использование в действующем оборудовании // Use in operating equipment | 337   | 454  | 556  | 362  | 85   |
| Использование в качестве сырья // Use as raw material                  | 27  | 33   | 34   | 32   | –    |
| Использование при производстве продукции // Use in production process  | 47  | 46   | 43   | 33   | 1    |
| Производство // Generation   | –   | 2    | 4    | 3    | 4    |
| Уничтожение // Destruction   | –   | 1    | –    | –    | 1    |
| Рециркуляция // Recycling  | –   | 2    | 3    | 3    | 1    |

На рисунке 1 по годам представлено количество субъектов Российской Федерации, из которых юридические лица и индивидуальные предприниматели подавали отчетность по обращению с ОРВ в Минприроды России (рис. 1 / fig. 1).

Анализируя рисунок 1 можно сказать, что доля субъектов Российской Федерации организации (ЮЛ+ИП) из которых не предоставляют в Минприроды России отчетность по обращению с ОРВ составляет в среднем 36 %, несмотря на то, что обращение с ОРВ в данных субъектах имеет место быть.

С целью визуализации интенсивности подачи отчетности организациями (ЮЛ+ИП) на территории Российской Федерации в период 2018–2022 гг. была построена картограмма (рис. 2 / fig. 2). Для построения картограммы была использована следующая градация. Если ЮЛ и ИП, которые находятся на территории

субъекта Российской Федерации не предоставляли отчетность об обращении с ОРВ, то таким субъектам присваивали ноль баллов, если на территории субъекта Российской Федерации отчетность предоставляли от 1 до 5 организаций (ЮЛ+ИП), то таким субъектам присваивали 1 балл. Если на территории субъекта Российской Федерации отчетность предоставляли от 6 до 10 организаций (ЮЛ+ИП), то таким субъектам присваивали 2 балла. Субъектам Российской Федерации, на территории которых отчетность предоставляли от 11 до 20 организаций (ЮЛ+ИП) присваивалось 3 балла, от 21 до 50 организаций (ЮЛ+ИП) присваивалось 4 балла, а субъектам на территории, которых отчетность предоставляли более 50 организаций, присваивалось 5 баллов.

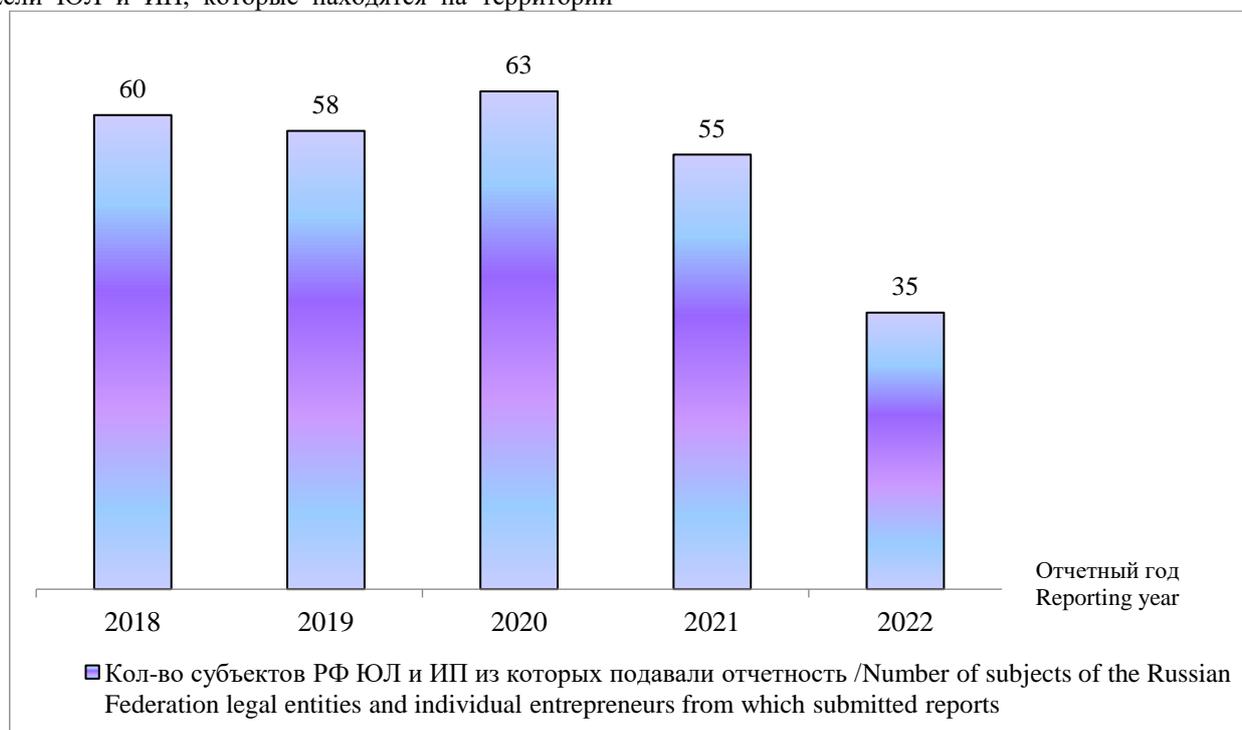
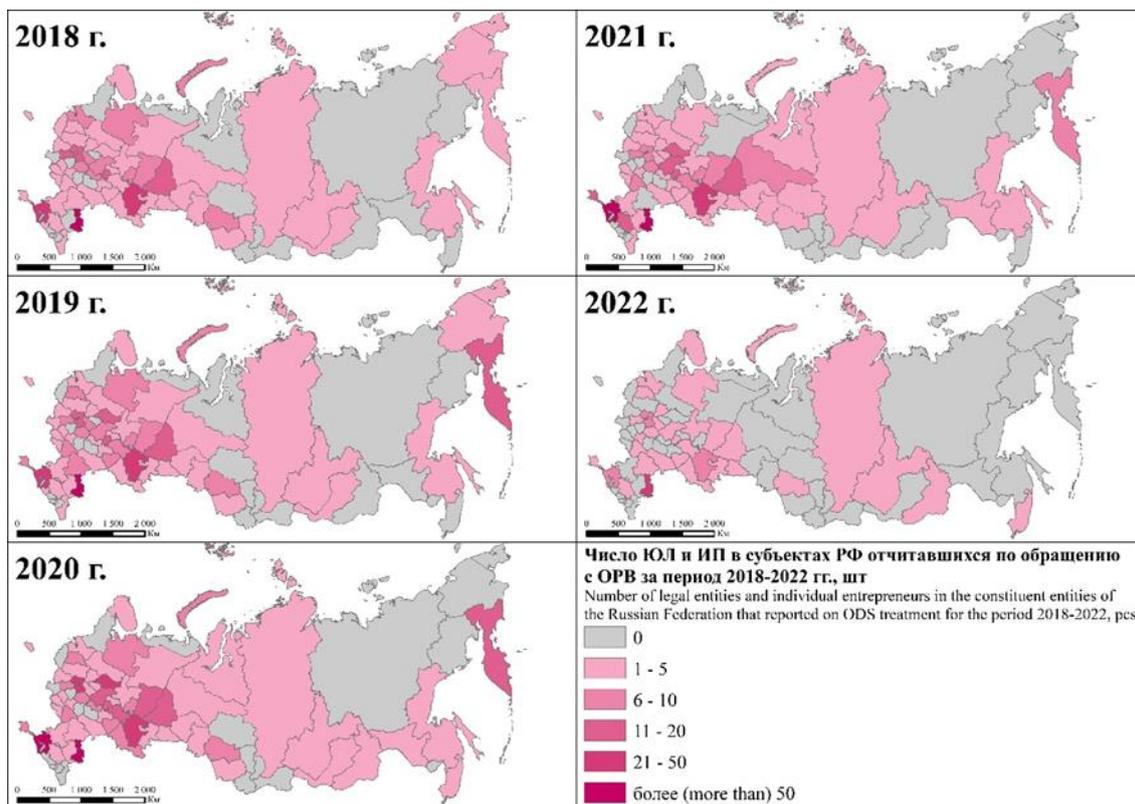


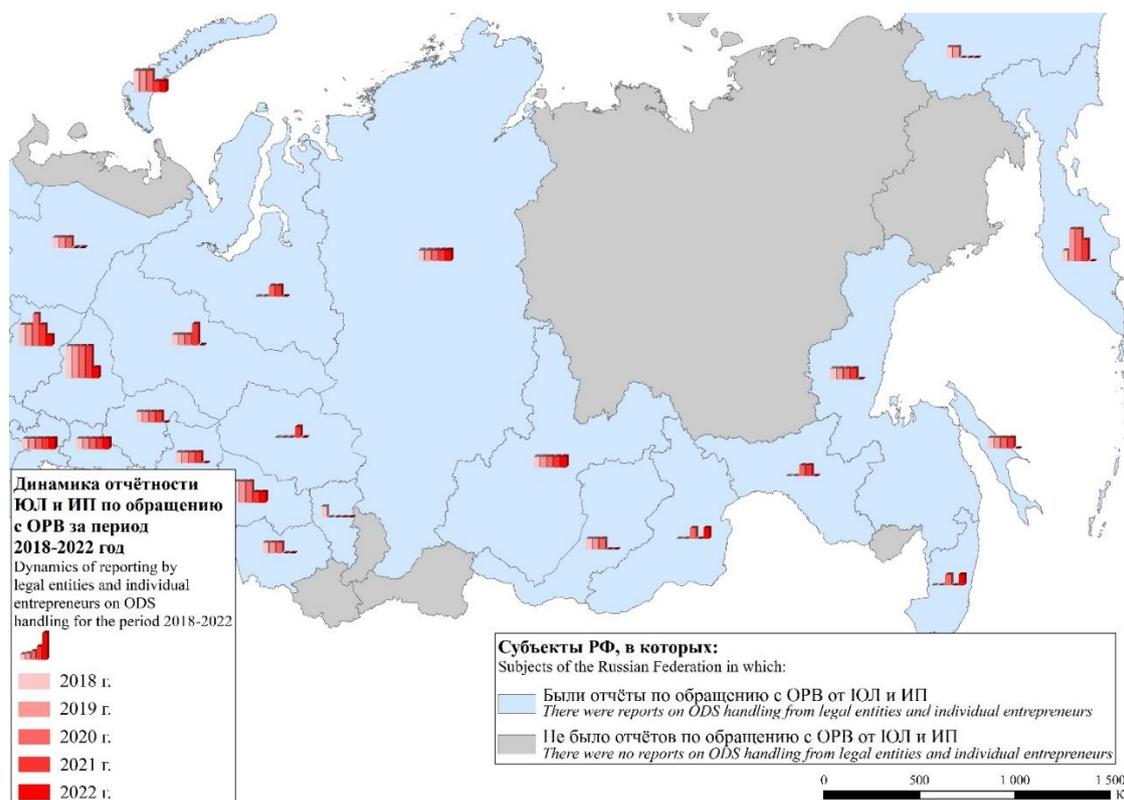
Рис. 1. Число субъектов РФ, в которых проводится обращение с ОРВ, согласно отчетности (по годам)  
Fig. 1. Number of Russian regions with ODS management according the official reports (by year)



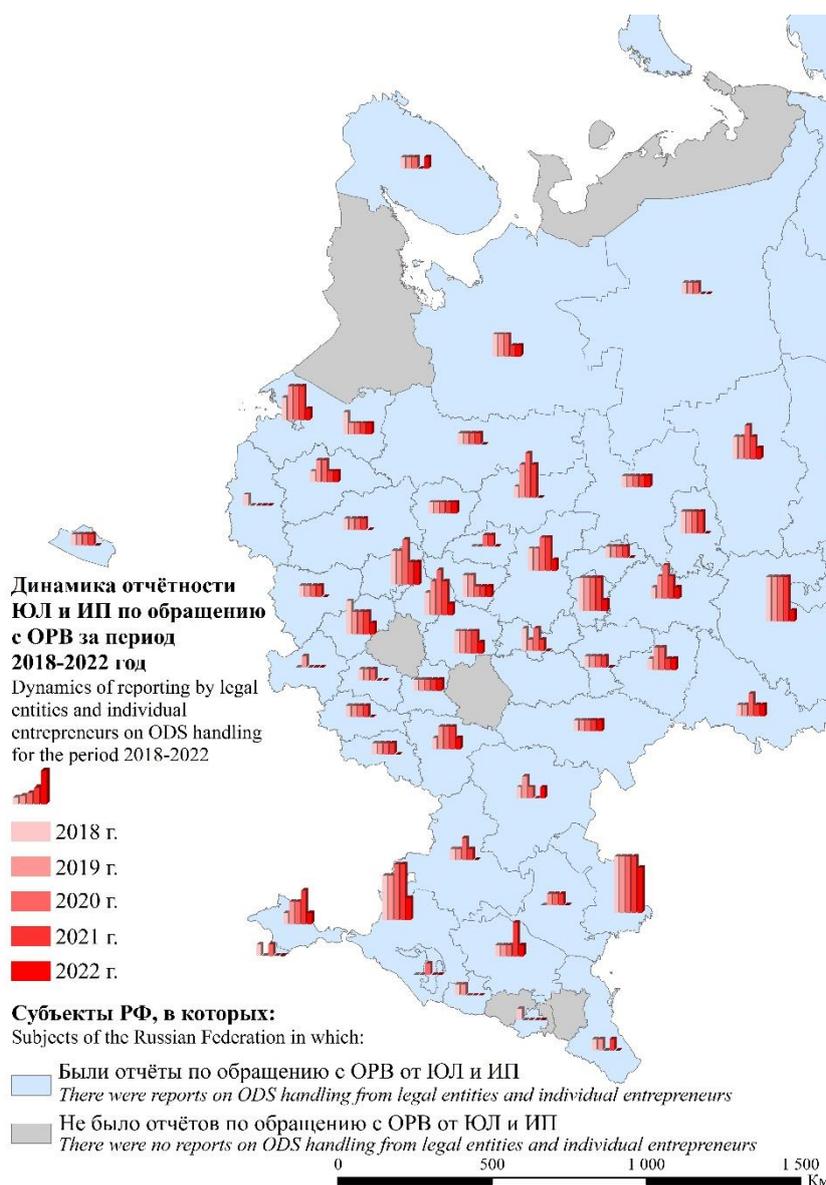
**Рис. 2. Число организаций, подавших отчеты об использовании ОРВ, по субъектам РФ в 2018-2022 гг.**  
**Fig. 2. Number of organizations that submitted reports on the use of ODS by Russian regions in 2018-2022**

На рис. 2 / fig. 2 видно, что в течении пяти лет только в единичных субъектах (Астраханская область, Краснодарский край) Российской Федерации отчет-

ность по обращению с ОРВ подавали более 50 организаций. В основном же организации в субъектах Российской Федерации либо вообще не отчитываются по ОРВ, либо отчитываются, но в небольшом количестве.



**Рис. 3. Динамика предоставления отчетности об обращении с ОРВ в субъектах в азиатской части России в 2018-2022 гг.**  
**Fig. 3. Dynamics of reporting on the ODS management in the Asian part of Russian regions in 2018-2022**



**Рис. 4. Динамика предоставления отчетности об обращении с ОРВ в субъектах в европейской части России в 2018-2022 гг.**

**Fig. 4. Dynamics of reporting on the ODS management in the European part of Russian regions in 2018-2022**

Также на основе проанализированных данных были построены картодиаграммы (рис. 3-4 / fig. 3-4), на которых для каждого субъекта Российской Федерации представлена динамика предоставления отчетности об обращении с ОРВ организациями (ЮЛ+ ИП) за период 2018-2022 гг.

Из картодиаграмм (рис. 3-4 / fig. 3-4) видно, что постоянное количество организаций, регулярно подающих отчетность об обращении с ОРВ с 2018 г. по 2021 г. было отмечено в следующих субъектах Российской Федерации: Красноярский край, Хабаровский край, Астраханская область, Белгородская область, Вологодская область, Иркутская область, Калининградская область, Кировская область, Курганская область, Курская область, Липецкая область, Омская область, Рязанская область, Саратовская область, Сахалинская область, Свердловская область, Смоленская область, Тверская область, Тюменская область, Челябинская область, Ульяновская область, Ярославская область, Республика Башкортостан, Республика Удмуртия, Республика Марий Эл, Чувашская Республика.

Также из картограмм (рис. 3-4 / fig. 3-4) видно, что в 2022 г. во многих субъектах Российской Федерации можно наблюдать резкое снижение количества организаций, которые подали отчетность об обращении с ОРВ, это связано с тем что, начиная с 2022 г. произошли изменения в нормативно-правовых документах и были изменены формы отчетности [4], что привело к снижению детализации сбора сведений по ОРВ.

#### Выводы

В Российской Федерации с 2018 по 2020 гг. наблюдалось стабильное увеличение количества организаций (ЮЛ+ИП), которые предоставляли ежегодную отчетность по обращению с ОРВ в Минприроды России. Так, в 2018 г. отчетность по обращению с ОРВ подали 408 организаций, в 2019 г. – 472 организации, а в 2020 г. – 613 организаций.

В 2021 г. число организаций, которые предоставили в Минприроды России отчетность снизилось на 30 % по сравнению с 2020 г. и составило 428 отчетов.

В 2022 г. отчетность подали всего 115 организаций, что на 80 % ниже чем в 2020 г., причиной этого могло

стать введено постановлением Правительства Российской Федерации от 18.02.2022 № 206 [4] новых форм отчетности.

Всего за пять лет (2018-2022 гг.) отчетность подали 941 организация, что свидетельствует о низкой регулярности предоставления отчетности по ОРВ в Минприроды России. Среди организаций, которые предоставили отчетность по обращению с ОРВ 97 % это юридические лица и 3 % – это индивидуальные предприниматели.

За период 2018-2022 гг. только 15 организаций предоставляли отчетность ежегодно, 120 организаций предоставляли отчетность четыре раза за пять лет, 216 организаций предоставляли отчетность три раза за пять лет, 229 организаций предоставляли отчетность два раза за пять лет, 361 организация предоставила отчетность один раз за пять лет.

В целом же за период 2018-2022 гг. динамику подачи отчетности по обращению с ОРВ юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями в Минприроды России также можно считать низкой, так как из 8 355 организаций, которые согласно Реестру объектов, оказывающих негативное воздействие, осуществляют обращение с ОРВ на территории Российской Федерации, только 7 % организаций предоставляют отчетность по обращению с ОРВ в Минприроды России.

#### Сведения об авторском вкладе:

Н.Л. Рачёва – идея статьи, постановка задачи исследования, сбор исходных данных и анализ материала, написание статьи, научное редактирование текста.

М.С. Беленко – обработка данных, построение картограммы и картодиаграммы в ГИС-пакете ArcGIS.

#### Contribution of the authors:

N.L. Racheva – idea of the article, formulation of the research problem, collection of initial data and analysis of material, writing the article, scientific editing of the text.

M.S. Belenko – data processing, construction of cartograms and map diagrams in the ArcGIS GIS package.

#### Список источников

1. Венская конвенция об охране озонового слоя: Конвенция от 22.03.1985. Режим доступа: справочная система «ТехЭксперт».

2. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой: Международный протокол от 16.09.1987. Режим доступа: справочная система «ТехЭксперт».

3. Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой. Ozone program: сайт URL:

[https://www.ozoneprogram.ru/ozonovoe\\_zakonodatelstvo/protokol/](https://www.ozoneprogram.ru/ozonovoe_zakonodatelstvo/protokol/) (дата обращения 16.01.2024).

4. О мерах государственного регулирования потребления и обращения веществ, разрушающих озоновый слой (с изм. на 01.09.2023): постановление Правительства Российской Федерации от 18.02.2022 № 206. Режим доступа: справочно-правовая система «КонсультантПлюс».

5. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 25.12.2023) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2024). Режим доступа: справочно-правовая система «КонсультантПлюс».

6. Что такое озон или озоновый слой?! Блог-статья к Международному дню охраны озонового слоя. Сентябрь 2020 (UNDP Узбекистан): сайт. URL: <https://www.undp.org/ru/uzbekistan/blog/chto-takoy-ozon-ili-ozonovyy-sloy> (дата обращения 16.01.2024).

#### References

1. Venskaya konvenciya ob ohrane ozonovogo sloya [Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer]: Convention of 22.03.1985. Access mode: «TechExpert» help system.

2. Monreal'skij protokol po veshchestvam, razrushayushchim ozonovyj sloj [Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer]: International Protocol of 16.09.1987. Access mode: «TechExpert» help system.

3. Monreal'skij protokol po veshchestvam, razrushayushchim ozonovyj sloj. Ozone program: official website. URL: [https://www.ozoneprogram.ru/ozonovoe\\_zakonodatelstvo/protokol/](https://www.ozoneprogram.ru/ozonovoe_zakonodatelstvo/protokol/) [Accessed 16th January 2024].

4. O merah gosudarstvennogo regulirovaniya potrebleniya i obrashcheniya veshchestv, razrushayushchih ozonovyj sloj [On measures of state regulation of the consumption and circulation of substances that destroy the ozone layer]: Decree of the Government of the Russian Federation of 18.02.2022 No 206. Access mode: reference and legal system «ConsultantPlus».

5. Ob ohrane okruzhayushchej sredy [On environmental protection]: Federal Law No. 7-FZ of 10.01.2002: red. date 25.12.2023. Access mode: reference and legal system «ConsultantPlus».

6. CHto takoe ozon ili ozonovyj sloj?! Blog-stat'ya k Mezhdunarodnomu dnyu ohrany ozonovogo sloya. Sentyabr' 2020 (UNDP Uzbekistan): official website. URL: <https://www.undp.org/ru/uzbekistan/blog/chto-takoy-ozon-ili-ozonovyy-sloy> [Accessed 16th January 2024].

Статья поступила в редакцию 19.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 12.03.2024.

The article was submitted 19.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 12.03.2024.

**АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

|                     |    |
|---------------------|----|
| Кадетов Н.Г.        |    |
| Шамонова М.А.....   | 6  |
| Семенов В.В.....    | 18 |
| Артамонова В.С.     |    |
| Бортникова С.Б..... | 24 |
| Гарькуша Д.Н.       |    |
| Федоров Ю.А.        |    |
| Косолапов А.Е.      |    |
| Усова Е.В.          |    |
| Анпилова Е.Л.....   | 37 |
| Егорова Д.О.        |    |
| Ташкинов Е.В.....   | 51 |
| Рачёва Н.Л.         |    |
| Беленко М.С.....    | 64 |

*Научное издание***АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**Том 10, №1  
2024Компьютерная верстка: С.Д. Мельникова  
Макет обложки: П.Ю. СанниковПодписано в печать 17.06.2024. Дата выхода: 28.06.2024  
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 8,37. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_Редакция научного журнала «Антропогенная трансформация природной среды»  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. ПГНИУ.  
Географический факультет, кафедра биогеоценологии и охраны природы  
Тел. (342) 239-64-87Издательский центр  
Пермского государственного  
национального исследовательского университета.  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15  
Тел. (342) 239-66-36*Распространяется бесплатно*