

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, биогеоценотической, 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 Бужмаков – заведующий кафедрой биогеоценологии 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 биогеоценологии 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 биогеоценологии и охраны природы

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

## СОДЕРЖАНИЕ

## РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

<b>Кадетов Н.Г., Урбанавичуте С.П., Гнеденко А.Е., Андриюшкевич Е.Н.</b> Изменение числа видов в послепожарных фитоценозах Керженского заповедника .....	6
<b>Чижова В.П., Иванов А.Н., Канаев К.С., Сорокина Е.Г.</b> Мониторинг состояния туристских маршрутов природного парка «Оленьи ручьи» .....	13

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

<b>Дзюба Е.А.</b> Современные представления о влиянии техногенеза на геохимические особенности почв: обзор...	20
<b>Семакина А.В.</b> Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния примеси в атмосферном воздухе .....	42
<b>Симонов В.Э., Леконцева Т.А.</b> Технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв и грунтов: обзор патентов .....	65
<b>Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н.</b> Загрязнение реки Тья и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Севербайкальска: оценка геохимическим методом.....	82

## CONTENTS

## SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

<b>Kadetov N., Urbanavichute S., Gnedenko A., Andryushkevich E.</b> Dynamics of plant species number in postpyrogenic phytocoenoses of the Kerzhensky reserve.....	6
<b>Chizhova V., Ivanov A., Kanaev K., Sorokina E.</b> Monitoring of the state of tourist routes of the "Olen'i ruch'i" Nature Park.....	13

## SECTION 2. POLLUTION

<b>Dziuba A.</b> Technogenesis influence on a geochemical features of soils: review of modern concepts.....	20
<b>Semakina A.</b> The main mathematical approaches for modelling impurity scattering processes in atmospheric air .....	42
<b>Simonov V., Lekontseva T.</b> Bioremediation technologies of oil-contaminated soils and subsoils: patent review .....	65
<b>Chebykin E., Kulikova N., Likhoshway Y., Sutorin A.</b> Pollution of Tyya River and Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Severobaikalsk Town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method .....	82



Нынешний номер АТПС состоит из двух разделов. В первом рассматриваются проблемы сохранения природной среды, ее восстановления после пожаров (Керженский заповедник) и в под воздействием рекреации (природный парк «Оленьи ручьи»). Во втором разделе предлагаются обширные литературные обзоры по геохимии почв Пермского края, моделям рассеивания поллютантов в атмосфере, оригинальная статья с экологической оценкой концентрации химических элементов в озере Байкал. Представлены результаты патентного поиска по биоремедиации.

Великолепный профессиональный коллектив авторов собрал наш, нужно сказать, постоянный автор. Н.Г. Кадетов и С.П. Урбанавичуте, А.Е. Гнеденко, Е.Н. Андриюшкевич представляют творческий симбиоз науки вуза, академии, заповедника, способный проводить весьма интересные оригинальные исследования. Для природной среды Керженского заповедника проведен анализ разнообразия видов травяно-кустарничкового яруса на постоянных пробных площадях, заложенных после пожаров. Выявлено влияние типа пожара, форм мезорельфа. Верховые пожары вызывают небольшое динамическое изменение числа видов. К последствиям низового пожара авторы относят более сглаженную динамику числа видов в их флористическом составе. При этом максимум богатства видов наблюдается на четвертом-пятом году сукцессии.

В.П. Чижова, А.Н. Иванов, К.С. Канаев, Е.Г. Сорокина в творческом содружестве решают задачи по проведению слежения за состоянием туристских маршрутов и их проблемных участков в широко известном природный парк «Оленьи ручьи», расположенном на Урале под Екатеринбургом. Предлагаются основные положения программы наблюдений природного парка: местообитания, пространственные и временные параметры. По «проблемным местам» туристских маршрутов разработаны мероприятия и рекомендации для восстановления природной среды. Авторы признают целесообразность отсыпки щебнем экологических троп, которая повысила устойчивость к рекреационной нагрузке.

Циклы химических элементов в биосфере, ее региональных участках в условиях антропогенной нагрузки важны как с теоретической, так и с практической точки зрения. Е.А. Дзюба продолжает считать, что основной проблематикой в геохимии выступает изучение закономерностей аккумуляции и рассеивания веществ. В научном обзоре лаконично рассмотрены основные теоретические представления классиков геохимии. Проанализированы данные о влиянии техногенеза на распределение химических элементов в природной среде. Рассмотрены проблемы техногенеза при добыче углеводородов; при эксплуатации месторождения калийных солей; особенности постантропогенной трансформации окружающей среды и потоки химических элементов после добычи каменного угля. Указаны количественные параметры миграции, накопления и рассеивания химических элементов в природно-технических, природно-техногенных экосистемах. Отдельно выделены результаты и выявленные закономерности для эколого-геохимического районирования Пермского края.

Наш новый автор, один из лучших практиков по моделированию загрязнений атмосферного воздуха в конкретных природных и антропогенных условиях – Алсу Валерьевна Семакина – выступает в роли теоретика, который довольно удачно пробует типизировать ныне существующие подходы к расчетам распространения поллютантов в воздушной среде. В результате проведенного анализа рекомендуется использование: моделей на основе аналитического решения уравнения диффузии и гауссовых моделей только для небольших по площади территорий; более сложных математических моделей взамен экспериментальных трудоемких натурных измерений; в масштабе регионального влияния выбросов от стационарных источников на состояние атмосферного воздуха достаточно эффективной признается методика определения параметров загрязнения в целом от населенного пункта, учета химической активности примесей и метеопараметров переноса примеси в атмосфере.

В.Э. Симонов, Т.А. Леконцева провели патентный поиск по всегда актуальной тематике в России и Пермском крае. В обзоре дан анализ основных направлений патентования технологий биоремедиации почв и грунтов после нефтяного загрязнения. Даются основные таксоны растений и частота их применимости в технологиях. Приводятся сведения о растениях, как о поглотителях тяжелых металлов. Можно теперь разрабатывать патенты.

Представители лимнологического института Сибирского отделения РАН Е.П. Чебыкин, Н.Н. Куликова, Е.В. Лихошвай и А.Н. Сутурин изучали, конечно, антропогенное воздействие на часть озера Байкал. Геохимическими способами авторы оценили влияние сточных вод г. Северобайкальска на прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья. В сточных водах обнаружено превышение нормативов по Р (69 ПДК), Mn (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Mo (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК) для Байкальской природной территории.

Номер получился сложным, но актуальным и, надеюсь, полезным на значительный период времени.

Главный редактор С.А. Бузмаков.

## РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 574.42 (470-341)

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-6-12>

EDN AHZUJO

**Изменение числа видов в послепожарных фитоценозах Керженского заповедника**

Никита Геннадьевич Кадетов<sup>1</sup>, Светлана Пранасовна Урбанавичуте<sup>2</sup>, Ангелина Евгеньевна Гнеденко<sup>3</sup>,  
Екатерина Никитична Андриюшкевич<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup> Государственный природный биосферный заповедник «Керженский», Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> Институт географии РАН, Москва, Россия

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

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

<sup>3</sup> [gnedenko.a.e@igras.ru](mailto:gnedenko.a.e@igras.ru)

<sup>4</sup> [andryushkevich03@mail.ru](mailto:andryushkevich03@mail.ru)

**Аннотация.** Приводится обзор изменения числа видов травяно-кустарничкового яруса на постоянных пробных площадях, заложенных в Керженском заповеднике после пожаров 2010 г. Показано, что на характер изменения этого показателя оказывают влияние как тип пожара, так и форма мезорельефа, к которой приурочена постоянная пробная площадь. Отмечено наличие максимумов и минимумов числа видов. Показано сходство характера изменения числа видов для участков с верховым и интенсивным низовым пожаром.

**Ключевые слова:** фитоценоз, число видов, пожар, Керженский заповедник, мезорельеф, постоянная пробная площадь

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке Госзадания ИГ РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8) «Биотические, географогидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования» и Программы развития Московского университета (№1220).

**Для цитирования:** Кадетов Н.Г., Урбанавичуте С.П., Гнеденко А.Е., Андриюшкевич Е.Н. Изменение числа видов в послепожарных фитоценозах Керженского заповедника // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 6-12. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-6-12>. EDN AHZUJO.

## SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Original Paper

**Dynamics of plant species number in postpyrogenic phytocoenoses of the Kerzhensky reserve**

Nikita G. Kadetov<sup>1</sup>, Svetlana P. Urbanavichute<sup>2</sup>, Angelina E. Gnedenko<sup>3</sup>, Ekaterina N. Andryushkevich<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Kerzhensky Natural State Reserve, Nizhny Novgorod, Russia

<sup>3</sup> Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

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

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

<sup>3</sup> [gnedenko.a.e@igras.ru](mailto:gnedenko.a.e@igras.ru)

<sup>4</sup> [andryushkevich03@mail.ru](mailto:andryushkevich03@mail.ru)

**Abstract.** An overview of changes in the herb-shrub layer number of species on permanent sample plots established in the Kerzhensky Reserve after the wildfires of 2010 is provided. It is shown that the nature of the change in this indicator is influenced by both the type of fire and the shape of the mesorelief to which the permanent sample plot is confined. The presence of maxima and minima in the number of species was noted. The similarity in the type of changes in the number of species for areas with crown and intense ground fires is shown.

**Keywords:** phytocoenosis, number of species, wildfire, Kerzhensky Reserve, mesorelief, permanent sample plot

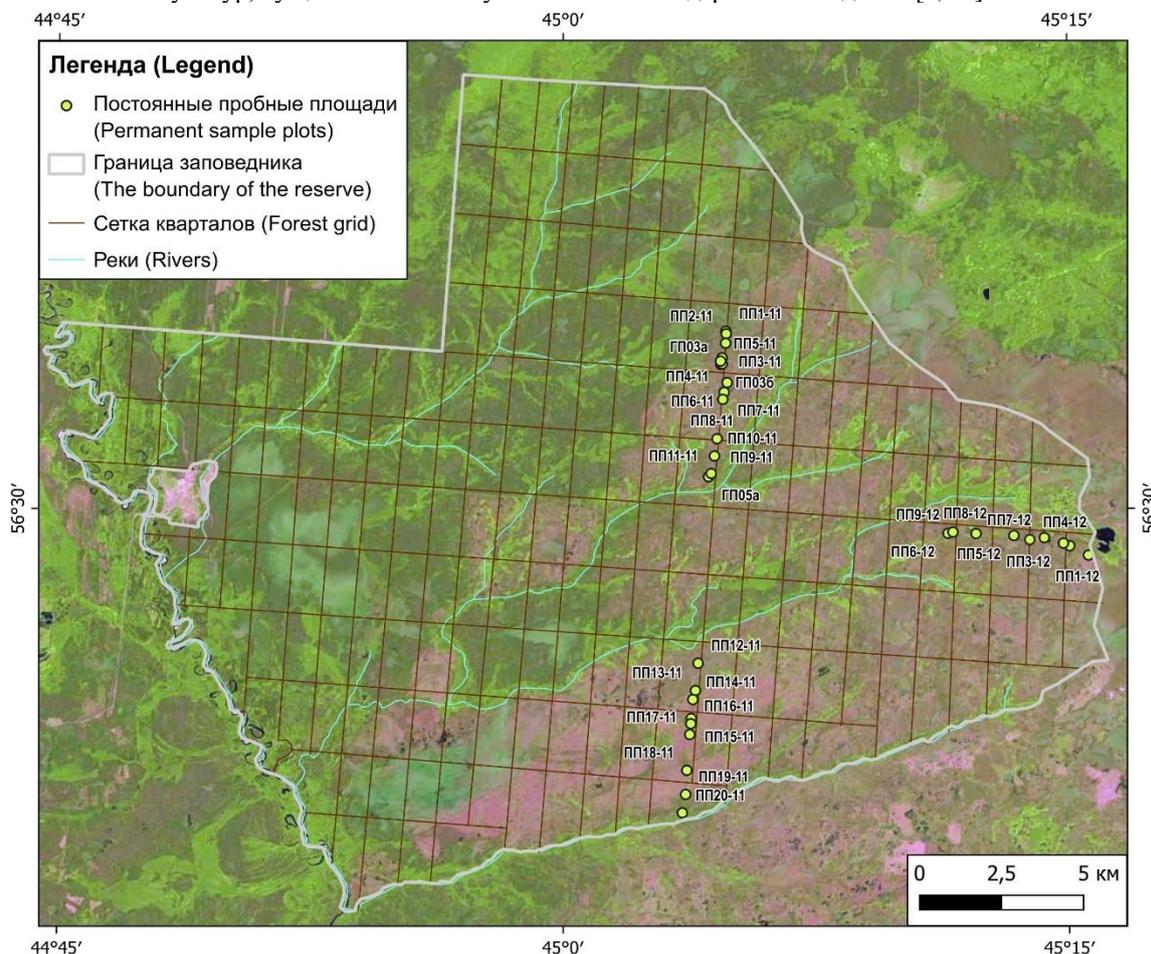
**Funding:** The study was carried out with the support of the State Assignment of the IG RAS FMWS-2024-0007 (1021051703468-8) «Biotic, geographic-hydrological and landscape assessments of the environment to create a basis for rational nature management» and the Program of Development MSU (#1220)

**For citation:** Kadetov, N., Urbanavichute, S., Gnedenko, A. and Andryushkevich, E., 2024. Dynamics of plant species number in postpyrogenic phytocoenoses of the Kerzhensky reserve. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 6–12. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-6-12>. EDN ANZUJO. (in Russian)

**Введение.** Проблемы влияния лесных пожаров на растительный покров и особенности дальнейшего восстановления фитоценозов приобретают всё большую актуальность в свете глобальных климатических изменений и связанного с ними увеличения числа и масштабов пожаров [11, 13, 14, 15]. Одними из крупнейших за последние десятилетия в России стали лесные пожары 2010 г. В значительной степени от них пострадало Нижегородское Заволжье, в особенности – южная его часть, приуроченная к песчаной равнине, занятой преимущественно сосновыми (*Pinus sylvestris* L.) лесами и болотами, включая расположенный здесь Керженский заповедник. Территория его примечательна тем, что за период, предшествовавший заповеданию, заметная её часть подверглась различным по длительности и силе антропогенным воздействиям. После имевших место в прошлом лесных пожаров проводились вырубki с последующим созданием не всегда успешных лесных культур, существовала сеть узкоко-

лейных железных дорог и несколько небольших населённых пунктов [4, 6, 7]. Во время пожаров 2010 г. воздействию огня в значительной степени подверглись именно антропогенно трансформированные фитоценозы, где ныне впервые восстановление происходит без участия человека [4].

**Материал и методика.** Изучение хода этих процессов проводится заповедником в сотрудничестве со специалистами МГУ имени М.В. Ломоносова и Института географии РАН с 2011 г. Основой его являются 30 постоянных пробных площадей (далее – ППП), заложенных в 2011-2012 гг. на пройденной пожарами территории (рис. 1 / fig. 1). Заложение ППП проводилось таким образом, чтобы охватить как различные вероятные допозарные сообщества, так и разные базовые формы мезорельефа (вершины грив, склоны, различные понижения) и типы пожаров (верховые, низовые, внутритпочвенные) (рис. 2 / fig. 2). Описания ППП проводились раз в один-два года по стандартным методикам [8, 10].



**Рис. 1. Расположение постоянных пробных площадей (ППП)**

**Fig. 1. Location of permanent sample plots (PSP)**

В числе основных параметров, отличающих как одно сообщество от другого, так и различные состояния одного и того же сообщества, традиционно рассматриваются флористический состав и структурные

показатели – чаще всего выраженность ярусов (со-мкнутость крон, проективное покрытие) [3, 9, 12].

ППП могут быть разбиты на группы исходя из типа пожара, бывшего в 2010 г., и приуроченности к базо-

вым элементам мезорельефа (табл. 1 / tabl. 1). На основе полученных групп был проведён анализ изменения числа видов наиболее показательной и динамичной компоненты фитоценозов ППП – травяно-кустарничкового яруса за первые 13 лет после пожара.

**Результаты и обсуждение.** Для расположенных на гривах сообществ, в целом, характерно постепенное увеличение числа видов, как правило, с выраженными промежуточными максимумом и минимумом (рис. 3 / fig. 3).

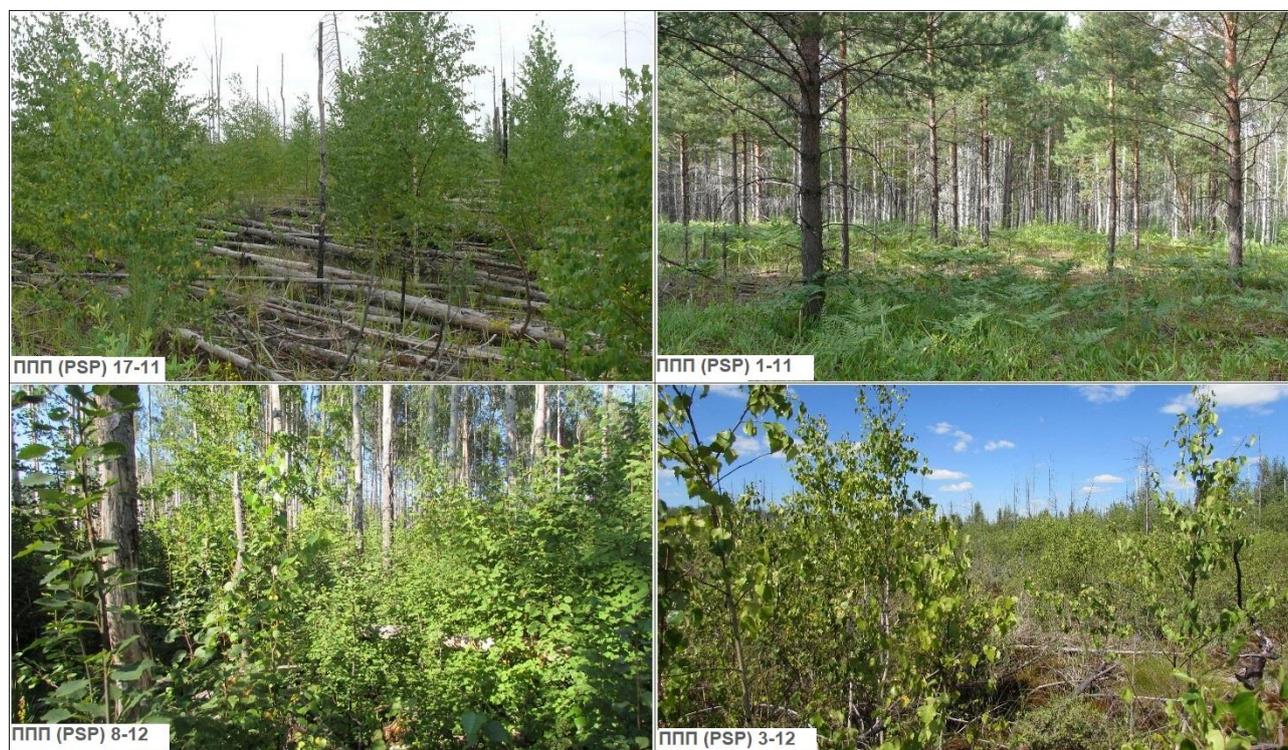


Рис. 2. Внешний вид отдельных ППП в 2018 г.  
Fig. 2. View of some permanent sample plots (2018)

### Группировка ППП по положению в мезорельефе и типам пожаров

Таблица 1

Table 1

#### Distribution of the PSPs by terrain position and type of wildfire

	<i>Верховой // Crown fire</i>	<i>Низовой // Ground fire</i>	<i>Внутрипочвенный // Peat-bog fire</i>
<i>Грива // Ridge</i>	13-11, 17-11, 19-11, 7-12	1-11, 6-11, 18-11, 4-12	
<i>Склон // Slope</i>	4-11, 15-11	5-11, 14-11, 1-12	
<i>Понижение // Lowland</i>	7-11, 8-11, 10-11, 12-11, 2-12, 6-12	2-11*, 9-11, 11-11, 16-11, 3-12*, 5-12*, 8-12, 9-12*	3-11, 20-11, 10-12

\* **Примечание:** ППП, на которых имел место интенсивный низовой пожар

\* **Note:** the PSPs, damaged by intensive ground fire

Участки, пройденные верховыми пожарами на гривах, большей частью приурочены к южной части заповедника, где при значительной высоте самих грив заметно участие в сложении сообществ «южноборовых» видов (змееголовник Рюйша (*Dracocephalum ruyschiana* L.), наголоватка васильковая (*Jurinea cyanoides* (L.) Reichenb.) и др.), а исходная видовая насыщенность сообществ заметно выше по сравнению с северной частью заповедника. Именно на этих ППП – 17-11 (разнотравно-наземнойниковая политриховая (*Hieracium umbellatum* L. – *Solidago virgaurea* L. –

*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth – *Polytrichum strictum* Brid.)<sup>1</sup>) и 19-11 (рачитниковая разнотравно-осоково-наземнойниковая политриховая (*Chamaecytisus ruthenicus* (Fisch. ex Woloszcz.) Klásk. – *Solidago virgaurea* – *Carex ericetorum* Poll. – *Calamagrostis epigeios* – *Polytrichum strictum*)) – наиболее чётко прослеживаются тренды, заметные также, хоть и в меньшей степени, и на более северных ППП, связанных с вершинами грив или близкими положениями. Здесь, в первые четыре года после пожара отмечалось увеличение числа видов в составе сообществ, затем – небольшой

<sup>1</sup> Здесь и далее названия сообществ приводятся по состоянию на последний год описания (2022–2023) / Here and further, the names of the phytocoenosis are given as of the last year of the description (2022–2023)

спад, сменившийся некоторым ростом числа видов впоследствии. Такая динамика связана с тем, что виды, свойственные самым начальным стадиям восстановления «перекрываются» с постепенно появляющимися видами более поздних стадий, а дальнейшее уменьшение обусловлено выбыванием первых.

Небольшой рост числа видов в последние годы связан как с появлением новых видов более поздних стадий, так и с «возвращением» в состав сообществ видов пионерных группировок по пятнам с нарушенным покровом (зоогенные нарушения, следы упавших деревьев и т.д.).

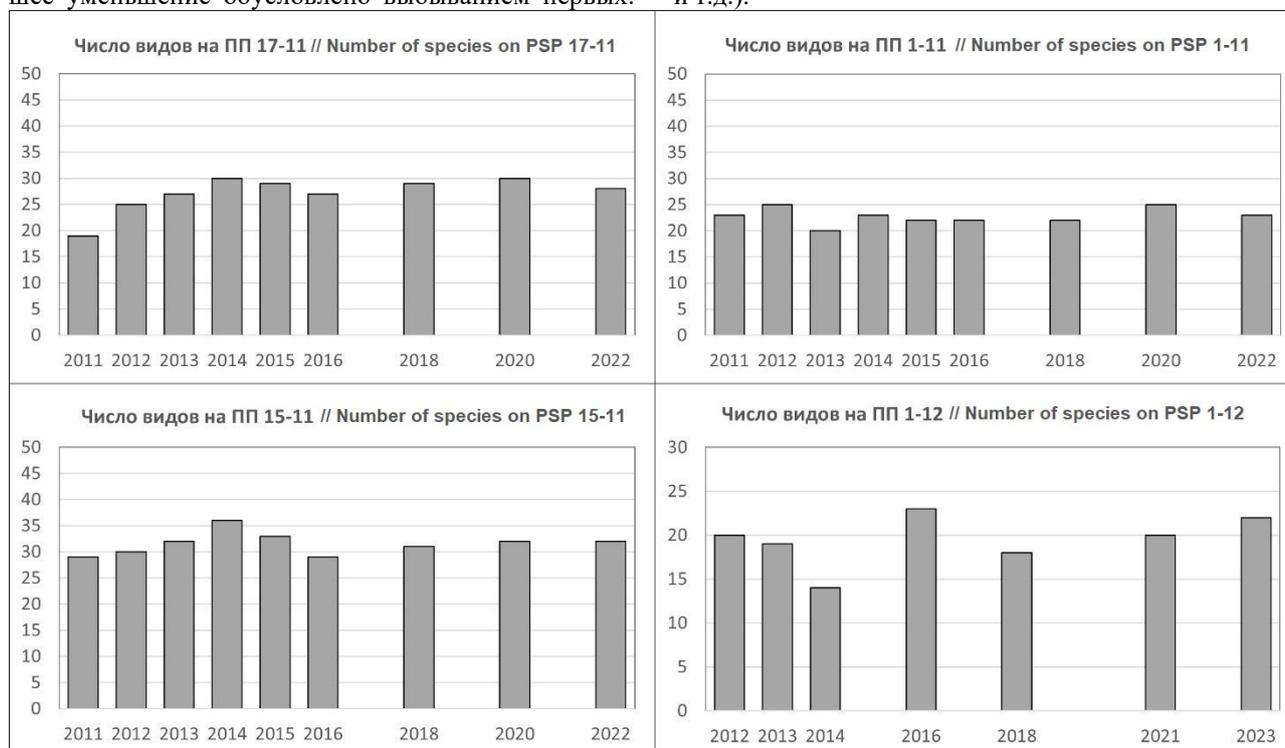


Рис. 3. Изменение числа видов на некоторых ППП, приуроченных к гривам и их склонам  
Fig. 3. Dynamics plant species number on some PSPs, allocated to ridges and its slopes

Сообщества на вершинах грив, пройденные низовыми пожарами, имеют довольно близкий характер изменения числа видов (рис. 3 / fig. 3). Здесь также наблюдается увеличение числа видов в первые годы, которое затем сменяется некоторым их уменьшением, а затем снова увеличением к десятому году после пожара. Причины подобного распределения сходны с таковыми для первой группы сообществ.

В целом, для грив характер изменения числа видов в составе сообщества сходен вне зависимости от типа пожара, который в большей степени, вероятно, определяет годы максимумов и минимумов и состав видов.

Динамика числа видов в составе сообществ, приуроченных к склонам, близка к таковой для вершин грив и прилежащих поверхностей (рис. 3 / fig. 3). Однако отмечаются некоторые отличия, особо заметные на ППП, пройденных низовыми пожарами, где в первые годы после пожара возможно сокращение числа видов травяно-кустарничкового яруса, связанное с более интенсивным, чем на вершинах грив, распадом древостоя.

Динамика числа видов в составе сообществ, приуроченных к понижениям разного рода, как правило, выражена в несколько меньшей степени: отсутствуют ярко выраженные максимумы и минимумы (рис. 4 / fig. 3).

Понижения, пройденные верховыми пожарами, в целом, показывают небольшие изменения числа видов от года к году, которые частью могут быть связаны с особенностями вегетационного периода того или

иного сезона. Так, число видов ППП 8-11 (бруснично-молиниевое-орляковая с обильным подростом берёзы (*Vaccinium vitis-idaea* L. – *Molinia caerulea* (L.) Moench – *Pteridium pinetorum* C.N. Page & R.R. Mill)) достигнув максимума к четвёртому году, оставалось неизменным вплоть до десятого, когда увеличилось за счёт появления плауна булавовидного (*Lycopodium clavatum* L.). На ППП 7-11 (молиниевое-вересковая долгомошная с обильным подростом берёзы (*Molinia caerulea* – *Calluna vulgaris* (L.) Hull) – *Polytrichum commune* Hedw.) и 12-11 (ивовая пушицево-осоковая долгомошная с подростом берёзы (*Salix aurita* L. – *Eriophorum vaginatum* L. – *Carex globularis* L. – *Polytrichum commune*)) число видов, в целом, даже несколько сократилось за счёт как выпадения из состава сообществ пионерных видов, в том числе отмечавшихся в первые годы по обводнённым вследствие поднятия уровня грунтовых вод и заросшим в последствии углублениям (рогоз широколистный (*Typha latifolia* L.), ситник развесистый (*Juncus effusus* L.), осока пепельная (*Carex canescens* L.) и др.), так и в результате выпадения (возможно, для некоторых видов временного) из состава сообществ видов, которые не смогли на данном этапе закрепиться вследствие как продолжающейся трансформации сообщества, так и конкуренции с другими видами (седмичник европейский (*Trientalis europaea* L.), лапчатка прямостоячая (*Potentilla erecta* (L.) Raeusch.) и др.). Вместе с тем, необходимо отметить появление в составе этих сообществ новых видов за последние годы

наблюдений – ожика волосистая (*Luzula pilosa* (L.) Willd.), вейник тростниковидный (*Calamagrostis arundinacea* (L.) Roth), орляк – свойственных в большей степени более сухим местообитаниям с одной стороны, и несколько более поздним стадиям восстанов-

ления – с другой. Отметим также, что несмотря на вышеописанные явления, в данных сообществах также, хоть и в меньшей степени, прослеживаются максимумы и минимумы числа видов во флористическом составе, о которых говорилось ранее.

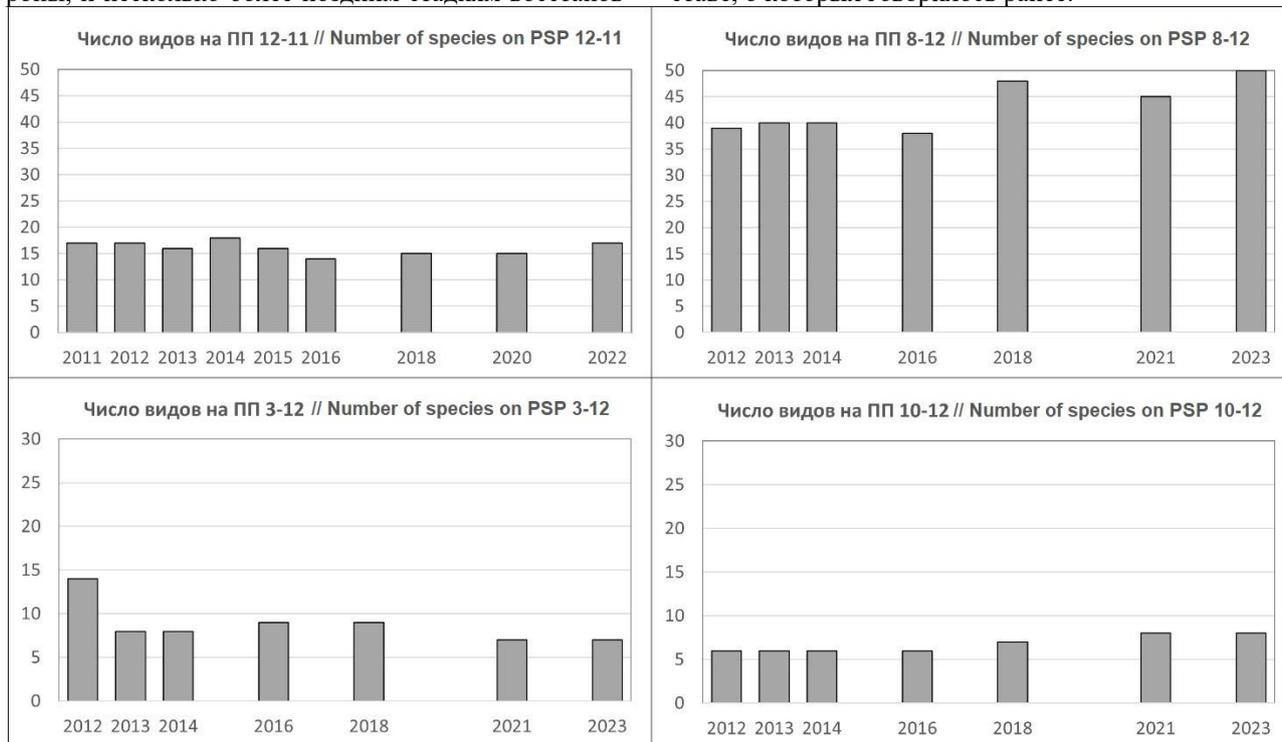


Рис. 4. Изменение числа видов на некоторых ППП, приуроченных к понижениям  
Fig. 4. Dynamics plant species number on some PSPs, allocated to lowlands

На ряде ППП отмечались интенсивные низовые пожары, приведшие к гибели древостоев уже в первый год после пожара и потому по своему влиянию в каком-то смысле близкие к верховым. В частности, подобный пожар наблюдался на ППП 2-12 (молиниевовересковая долгомошная (*Molinia caerulea* – *Calluna vulgaris* – *Polytrichum commune*)) и привёл к полной гибели древостоя. Учитывая невысокую видовую насыщенность и меньшую повторность описаний, общий ход динамики числа видов здесь в известной степени близок к сообществам понижений, пройденным верховым пожаром: максимумы и минимумы выражены чуть менее ярко.

Особо выделяется ППП 3-12 (ивовая молиниевосоковая долгомошная (*Salix cinerea* L. – *Molinia caerulea* – *Carex lasiocarpa* Ehrh. – *Polytrichum commune*)), где, на фоне в целом малого числа видов (8-9), главный максимум приходится на второй год после пожара (первый год описания), когда единственный раз были отмечены сразу шесть видов, четыре из которых явно являются пионерными (виды рода кипрей (*Epilobium* sp.) и щучка дернистая (*Deschampsia cespitosa* (L.) Beauv.)); один, вероятно, своего рода «дожарный реликт», затем выпавший из состава сообщества (осока вздутая (*Carex rostrata* Stokes)); а ещё один – чистец болотный (*Stachys palustris* L.) – может рассматриваться и как пионерный вид, и как такой же «реликт», и как случайный занос с дороги. Вместе с тем, понимая всю условность подобного утверждения, без учёта этих видов, динамика общего их числа на этой ППП весьма сходна с таковой на ППП 5-12

(пушицево-осоковая сфагново-долгомошная (*Eriophorum vaginatum* – *Carex lasiocarpa* – *Sphagnum* sp. – *Polytrichum commune*)) и 9-12 (пушицевая долгомошная (*Eriophorum vaginatum* – *Polytrichum commune*)). Эти площади весьма близки по общему ходу данного показателя, видовому составу (и флористической бедности) и ландшафтному облику: своего рода «осоковники» с пушицей, сформировавшиеся на понижениях, ранее занятых заболоченными сосняками («сосна по болоту»). Здесь также отмечались интенсивные низовые пожары, отчасти переходящие во внутрпочвенные. Несмотря на известные отличия в составе, динамика числа видов на них близка к таковой, описанной для понижений с верховыми пожарами (и отчасти – с низовыми).

Для сообществ понижений, пройденных низовым пожаром, также в основном свойственна более сглаженная динамика числа видов в их флористическом составе. При этом максимумы числа видов на четвёртом-пятом году и последующее снижение с некоторым увеличением к десятому году также отмечаются.

Ряд ППП, приуроченных к понижениям и пройденных низовыми пожарами, характеризуется максимальным числом видов в составе травяно-кустарничкового яруса из всех не только в отдельные годы наблюдений, но и в течении всего послепожарного периода. Характерна динамика числа видов на самой богатой ППП из всех – 16-11 (осиновая разнотравно-золотарниково-ландышешевая (*Populus tremula* L. – *Melampyrum pratense* L. – *Melica nutans* L. – *Solidago virgaurea* – *Convallaria majalis* L.)). Здесь число видов, постепенно увеличиваясь

достигает максимума на пятый год и затем остаётся неизменным, однако сам состав видов меняется.

Особого упоминания заслуживает ППП 8-12 (липово-черноольховая орляково-вейниково-разнотравная (*Tilia cordata* Mill. – *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn – *Pteridium pinetorum* – *Calamagrostis arundinacea* – *Rubus saxatilis* L. – *Stellaria holostea* L.)), рассмотрению хода восстановления растительного покрова на которой в первые годы была посвящена отдельная публикация [5]. Общий характер изменения числа видов здесь также сходен с отмеченным ранее и в целом присутствием остальным площадям на понижениях, но в деталях имеются отличия, связанные с особенностями расположения ППП, обусловившими высокую видовую насыщенность. Так, максимум здесь отмечается позже – на восьмой-девятый год после пожара и связан, помимо ранее указанных факторов, с существующей на тот момент высокой мозаичностью самого сообщества и, в какой-то степени, появившейся контрастностью условий между различными частями ППП (например, «углом» со сформировавшимися зарослями подроста ольхи чёрной и сравнительно осветлённым пятном с распавшимися пологими древостоями).

В целом, для понижений характер изменения числа видов в флористическом составе сообществ, как правило, менее ярок, чем для грив, хотя выделение максимумов и минимумов также возможно. В ряде случаев число видов, достигая максимума с течением первых лет, затем практически не изменяется. В сообществах, испытавших влияние подъёма уровня грунтовых вод, отмечается уменьшение числа видов и снижение видовой насыщенности.

При наличии **внутрипочвенных пожаров** (как правило, в сочетании с низовыми), отмечаемых на заболоченных территориях (ППП 3-11, 20-11, 10-12) с довольно низкой исходной видовой насыщенностью и числом видов в флористическом составе до пожаров, отмечается динамика числа видов в большей степени сходная с таковой для понижений с низовыми пожарами. На ППП 3-11 (сосновая пушицево-миртово-подбеловая сфагновая (*Pinus sylvestris* – *Eriophorum vaginatum* – *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench – *Andromeda polifolia* L. – *Sphagnum* sp.)) после выпадения из состава сообщества пионерных видов (на третий год) и «закрепления» в его составе не отмечавшихся в первый год голубики (*Vaccinium uliginosum* L.) и клюквы мелкоплодной (*Oxycoccus microcarpus* Turcz. ex Rupr.) (на пятый год), изменений в числе видов не происходит. На ППП 20-11 (берёзово-сосновая голубично-чернично-молиниевая долгомошно-сфагновая (*Betula pubescens* Ehrh. – *Pinus sylvestris* – *Vaccinium uliginosum* – *Vaccinium myrtillus* L. – *Molinia caerulea* – *Polytrichum commune* – *Sphagnum* sp.)) постепенно происходило увеличение числа видов, достигшее максимума, вероятно, уже на пятый год, а затем колебавшееся в зависимости от обнаружения или не обнаружения пальчатокоренника (*Dactylorhiza* sp.), которому свойственны заметные колебания численности и встречаемости от года к году [2]. На ППП 10-12 (сосновая пушицево-клюквенно-подбеловая сфагновая (*Pinus sylvestris* – *Eriophorum vaginatum* – *Oxycoccus palustris* Pers. – *Andromeda polifolia* – *Sphagnum* sp.)) число ви-

дов остаётся практически неизменным, немного увеличиваясь в последние годы за счёт появления видов с низким обилием, вероятно произраставших и до пожара, но временно выпавших из состава (осока шаровидная, брусника). Подобный ход изменения числа видов уже был показан ранее для ППП, где внутрипочвенные пожары отмечались с вероятностью, переходя из интенсивных низовых.

Обобщая полученные данные, можно сказать, что сочетание типа пожара и положения сообщества в рельефе определяет ход изменения числа видов в его составе, причём приуроченность к формам мезорельефа в первую очередь влияет на характер общей динамики этого показателя, а тип пожара в большей степени определяет годы максимумов и минимумов количества видов и их состав. Видовая насыщенность сообществ в целом не обнаруживает чёткой связи с приуроченностью к формам мезорельефа или типом пожара, однако сообщества с наибольшим числом видов связаны с понижениями, пройденными низовым пожаром.

#### Сведения об авторском вкладе

Н.Г. Кадетов – разработка проблематики и концепции работы, участие в полевых работах и обработке материалов, подготовка первого варианта рукописи, вычитка финального варианта статьи.

С.П. Урбанавичуте – разработка проблематики и концепции работы, участие в полевых работах и обработке материалов, вычитка финального варианта статьи.

А.Е. Гнеденко – участие в полевых работах, вычитка финального варианта статьи.

Е.Н. Андриушкевич – участие в полевых работах, вычитка финального варианта статьи.

#### Contribution of the authors

N.G. Kadetov – development of the problems and concept of the work, participation in field work and materials analysis, preparation of the first version of the manuscript, proofreading of the final version of the article.

S.P. Urbanavichute – development of the problems and concept of the work, participation in field work and materials analysis, proofreading of the final version of the article.

A.E. Gnedenko – participation in field work and materials analysis, proofreading of the final version of the article.

E.N. Andryushkevich – participation in field work and materials analysis, proofreading of the final version of the article.

#### Список источников

1. Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Нештаев В.Ю., Нештаева В.Ю., Ставрова Н.И., Ярмишко В.Т., Ярмишко М.А. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. 240 с.
2. Вахрамеева М.Г., Варлыгина Т.И., Татаренко И.В. Орхидные России (биология, экология и охрана). М.: Тов-во науч. изд. КМК, 2014. 437 с.
3. Воронов А.Г. Геоботаника. М.: Высшая школа, 1973. 384 с.
4. Кадетов Н.Г. Некоторые аспекты восстановления разнообразия лесных сообществ полесского ландшафта в условиях периодических катастрофических

пожаров (на примере Керженского заповедника) // Proceedings of the International Conference «Landscape Dimensions of Sustainable Development: Science – Planning – Governance». Tbilisi: Ivane Javaknishvili Tbilisi State University, 2017. P. 581-591.

5. Кадетов Н.Г., Астахова М.А., Гнеденко А.Е., Урбанавичуте С.П. Черты послепожарной динамики лиственных широколиственных лесов Керженского заповедника // Биогеография: Материалы московского городского отделения Русского географического общества. Вып. 20. М.: ЭИПСиПаблицинг, 2018. С. 99-106.

6. Константинов А.В. Жаровой лес. Нижний Новгород: ННГУ, 2004. 71 с.

7. Кораблёв О.Л. История заселения территории заповедника и топонимика населённых пунктов // Труды ГПЗ «Керженский». 2001. Т.1. 389-403.

8. Миркин Б.М., Наумова Л.Г., Соломещ А.И. Современная наука о растительности. М.: Логос, 2002. 264 с.

9. Сукачёв В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.

10. Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.

11. Шенников А.П. Введение в геоботанику. Л.: Изд-во ЛГУ, 1964. 448 с.

12. Dubrovskaya O.A., Kostornaya A.A., Solovyeva I.A., Martynova I.A., Rublev I.V., Voronova A.E. Analysis of the meteorological situation during period of forest fires and smoke-blanketing monitoring in Siberia in 2019 // Current problems in remote sensing of the Earth from space. 2020. T. 17. № 6. P. 25–29. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-25-29>

13. Flannigan M.D., Stocks B.J., Turetsky M.R., Wotton B.M. Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Global Change Biology. 2009. V.15. P. 549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>

14. Leskinen P., Lindner M., Verkerk P.J., Nabuurs G.J., Van Brusselen J., Kulikova E., Hasegawa M., Lerink B. (eds.). Russian forests and climate change. European Forest Institute. 2020. 139 p. <https://doi.org/10.36333/wscu11>

## References

1. Andreyeva, Ye., Bakkal, I., Gorshkov, V., Lyanguzova, I., Maznaya, Ye., Neshatayev, V., Neshatayeva, V., Stavrova, N., Yarmishko, V. and Yarmishko, M., 2002. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Metody izucheniya lesnykh soobshchestv]. St. Petersburg, NIIKhimii SPbGU, 2002. 240 p. (in Russian)

2. Vakhrameeva, M., Varlygina, T. and Tatarenko, I., 2014. *Orkhidnyye Rossii (biologiya, ekologiya i okhrana)* [Orchidaceae of Russia (biology, ecology and conservation)]. Moscow, Tov-vo nach. izd. KMK. 437 p. (in Russian)

3. Voronov, A., 1973. *Geobotanika* [Geobotany]. Moscow, Vysshaya shkola. 384 p. (in Russian)

4. Kadetov, N., 2017. *Nekotoryye aspekty vosstanovleniya raznoobraziya lesnykh soobshchestv poleskogo landshafta v usloviyakh periodicheskikh katastroficheskikh pozharov (na primere Kerzhenskogo zapovednika)* [Some Aspects of Restoration of Diversity of Forest Communities of the Polesie landscape in Conditions of Periodic Catastrophic Fires (on the Example of the Kerzhinski Nature Reserve)]. In: *Landscape Dimensions of Sustainable Development: Science – Planning – Governance: Proceedings of the International Conference, 2017, Tbilisi, Ivane Javaknishvili Tbilisi State University, pp. 581-591.* (in Russian)

5. Kadetov, N., Astakhova, M., Gnedenko, A. and Urbanavichute, S., 2018. Cherty poslepozharnoy dinamiki listvennykh shirokotravnykh lesov Kerzhenskogo zapovednika [Features of post-fire dynamics of deciduous broad-grass forests of the Kerzhinski Nature Reserve]. *Biogeografiya: Proceedings of Moscow City Branch of the Russian Geographical Society. Moscow, EyPiSiPabliching, 20, pp. 99-106.* (in Russian)

6. Konstantinov, A., 2004. *Zharovoy les* [Zharovoy forest.]. Nizhniy Novgorod: NNGU. 71 p. (in Russian)

7. Korablov, O., 2001. Istoriya zaseleniya territorii zapovednika i toponimika naselennykh punktov [History of settlement of the reserve territory and toponymy of settlements]. *Trudy GPZ «Kerzhenskiy»*. 1. 389-403 pp. (in Russian)

8. Mirkin, B., Naumova, L. and Solomeshch, A., 2002. *Sovremennaya nauka o rastitel'nosti* [Modern science of vegetation]. Moscow, Logos. 264 p. (in Russian)

9. Sukachov, V. and Zonn, S., 1961. *Metodicheskiye ukaza-niya k izucheniyu tipov lesa* [Methodical instructions for the study of forest types]. Moscow.: Izd-vo AN SSSR. 144 p. (in Russian)

10. Shvidenko, A., Shchepashchenko, D., 2013. Klimaticheskiye izmeneniya i lesnyye pozhary v Rossii // *Lesovedeniye*. (5), pp. 50-61. (in Russian)

11. Shennikov, A., 1964. *Vvedeniye v geobotaniku* [Introduction to Geobotany]. Leningrad, Izd-vo LGU. 448 p. (in Russian)

12. Dubrovskaya, O., Kostornaya, A., Solovyeva, I., Martynova, I., Rublev, I. and Voronova, A., 2020. Analysis of the meteorological situation during period of forest fires and smoke-blanketing monitoring in Siberia in 2019. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 17(6). pp. 25-29. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-6-25-29>

13. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M. and Wotton, B., 2009. Impact of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15. pp. 549-560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>

14. Leskinen, P., Lindner, M., Verkerk, P., Nabuurs, G., Van Brusselen, J., Kulikova, E., Hasegawa, M. and Lerink, B., 2020. *Russian forests and climate change*. European Forest Institute. 139 p. <https://doi.org/10.36333/wscu11>

Статья поступила в редакцию 17.10.2024; одобрена после рецензирования 28.10.2024; принята к публикации 02.11.2024.

The article was submitted 17.10.2024; approved after reviewing 28.10.2024; accepted for publication 02.11.2024.

## РАЗДЕЛ 1. СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

УДК 502.4

<https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-13-19>

EDN FYTMSC

**Мониторинг состояния туристских маршрутов природного парка «Оленьи ручьи»**

**Вера Павловна Чижова<sup>1</sup>, Андрей Николаевич Иванов<sup>2</sup>, Кирилл Сергеевич Канаев<sup>3</sup>, Елена Геннадьевна Сорокина<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup> Природный парк «Оленьи ручьи»

<sup>1</sup> [v.p.chizhova@gmail.com](mailto:v.p.chizhova@gmail.com)

<sup>2</sup> [a.n.ivanov@mail.ru](mailto:a.n.ivanov@mail.ru)

<sup>3</sup> [kanaev.kirill@bk.ru](mailto:kanaev.kirill@bk.ru)

<sup>4</sup> [Lena.Sorokina.71@inbox.ru](mailto:Lena.Sorokina.71@inbox.ru)

**Аннотация.** В статье обсуждаются вопросы, связанные с проведением мониторинга туристских маршрутов и их проблемных участков в природных парках. В качестве примера выбран природный парк «Оленьи ручьи», расположенный на Среднем Урале. На основе методики организации системы комплексного рекреационного мониторинга ООПТ [5] разработаны основные положения программы мониторинга природного парка: места наблюдений и наблюдаемые параметры, периодичность наблюдений. Выявлены «проблемные места» туристских маршрутов, по каждому из которых даны рекомендации по снижению рекреационной нагрузки. Установлено, что отсыпка щебнем дорожного полотна маршрутов существенно повысила их устойчивость к рекреационной нагрузке.

**Ключевые слова:** природный парк, туристские маршруты, рекреационный мониторинг, допустимые нагрузки, допустимые изменения.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность администрации и сотрудникам природного парка «Оленьи ручьи» за возможность проведения экспедиции и предоставление базовых материалов для работы.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова № 121051300176-1.

**Для цитирования:** Чижова В.П., Иванов А.Н., Канаев К.С., Сорокина Е.Г. Мониторинг состояния туристских маршрутов природного парка «Оленьи ручьи» // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 13-19. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-13-19>. EDN FYTMSC.

## SECTION 1. NATURE AND LANDSCAPE CONSERVATION

Original Paper

**Monitoring of the state of tourist routes of the "Olen'i ruch'i" Nature Park**

**Vera P. Chizhova<sup>1</sup>, Andrey N. Ivanov<sup>2</sup>, Kirill S. Kanaev<sup>3</sup>, Elena G. Sorokina<sup>4</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>4</sup> «Olen'i ruch'i» Nature Park

<sup>1</sup> [v.p.chizhova@gmail.com](mailto:v.p.chizhova@gmail.com)

<sup>2</sup> [a.n.ivanov@mail.ru](mailto:a.n.ivanov@mail.ru)

<sup>3</sup> [kanaev.kirill@bk.ru](mailto:kanaev.kirill@bk.ru)

<sup>4</sup> [Lena.Sorokina.71@inbox.ru](mailto:Lena.Sorokina.71@inbox.ru)

**Abstract:** The article discusses the issues related to the monitoring of tourist routes and their problem areas in nature parks, using the "Olen'i ruch'i" [Deer Creek] Nature Park located in the Middle Urals as a case study. Based on a methodology for organizing a system of integrated recreational monitoring of protected areas, the main components of the monitoring program for the Nature Park were developed, including observation sites, observable parameters, and the frequency of observations. The authors identified weaknesses in the tourist routes and provided recommendations for reducing recreational load to each route. It was revealed that the gravel filling of the trail beds significantly increased their resistance to recreational load.

**Keywords:** Nature Park, tourist routes, recreational monitoring, permissible loads, permissible changes.

**Acknowledgements:** The authors would like to express their gratitude to the administration and staff of the "Olen'i ruch'i" Nature Park for providing the opportunity to conduct the expedition and for supplying the essential materials for this research.

The research was financially supported within the framework of the State Assignment of the Faculty of Geography of Moscow State University no. 121051300176-1.

© Чижова В.П., Иванов А.Н., Канаев К.С., Сорокина Е.Г., 2024



**For citation:** Chizhova, V., Ivanov, A., Kanaev, K. and Sorokina, E., 2024. Monitoring of the state of tourist routes of the "Olen'i ruch'i" Nature Park. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 13-19. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-13-19>. EDN FYTMSC. (in Russian)

## Введение

Экологический туризм – одна из наиболее популярных разновидностей туризма, связанных с природой – развивается преимущественно на базе особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Лидирующую роль в развитии туризма в ООПТ в России играют заповедники и национальные парки, суммарное число организованных туристов, посетивших эти категории ООПТ, достигло в 2023 г. 14,5 млн чел. [3]. Возрастающий с каждым годом поток туристов в ООПТ во многих случаях вызывает проблемы, связанные с рекреационной дигрессией ландшафтов [1]. Вопросам нормирования рекреационных нагрузок в ООПТ посвящена достаточно большая литература, например [2, 8, 10, 11]. Показано, что одной из необходимых составляющих при развитии туризма в ООПТ является регулярный эколого-рекреационный мониторинг [7]. Мониторинг каждого туристского маршрута должен проводиться не реже двух раз в год: до начала туристского сезона и после его окончания, иногда он бывает необходим и во время пиковых нагрузок. Регулирование ёмкости маршрута в сторону её уменьшения или увеличения проводится с учётом данных мониторинга, сезонов года, погодных условий и иных факторов. При появлении признаков заметной дигрессии почвенного и растительного покрова, а также других проявлений деградации природного комплекса в результате его туристско-экскурсионного использования, необходимо снизить нагрузку и/или провести восстановительную рекультивацию. Параллельно рекомендуется увеличить количество площадок мониторинга за счёт выделения новых в наиболее дигрессивных условиях [12].

Наряду с заповедниками и национальными парками, имеющими федеральный уровень подчинения, одной из наиболее популярных категорий ООПТ в последние годы стали природные парки, находящиеся в ведении субъектов РФ. Ежегодный поток туристов в некоторых природных парках превышает 100 тыс. чел./год. Вместе с тем теория и практика организации экологического туризма в природных парках, имеющих свои выраженные особенности в задачах, функциональном зонировании, управлении и пр., в научно-методическом отношении разработаны недостаточно.

Цель настоящей статьи – на примере одного из природных парков Среднего Урала обсудить некоторые ключевые вопросы, связанные с проведением мониторинга туристских маршрутов в природных парках России.

Основная решаемая задача – на примере природного парка «Оленьи ручьи» провести анализ существующего рекреационного обустройства и предложить новый подход для повышения устойчивости туристских маршрутов к рекреационной нагрузке, а значит и увеличения ёмкости троп.

## Объекты и методы исследований

Природный парк «Оленьи ручьи» расположен на Среднем Урале, для которого (в отличие от Северного и Южного Урала) характерны сравнительно невысокие лесистые горные хребты высотой в среднем 200-400 м

над уровнем моря. На северо-востоке природного парка поднимается Бардымский хребет. Наиболее высокая отметка в пределах «Оленьих ручьев» – гора Орловка (469 м над уровнем моря). Рельеф на этом участке холмистый и сильно расчленённый. Горные породы представлены карбонатными породами (в основном известняками и доломитами), а также кварцевыми песчаниками и глинистыми сланцами. Присутствие карбонатных пород обуславливает наличие карстовых форм рельефа: пещеры, воронки, карстовые «мосты» и провалы. В границах ООПТ расположен крупнейший на Среднем Урале карстовый провал Большой – пещера вертикального типа глубиной 33 м. Все карстовые формы хорошо изучены и являются привлекательными туристскими объектами наряду с рекой Сергой, выделяющейся весьма живописными и высокими береговыми утёсами.

Практически вся территория парка залесена. Преобладают елово-березово-сосновые леса с вейнико-разнотравным покровом. Особая ценность флоры «Оленьих ручьев» – реликты и эндемики растительного мира [9], отдельные представители которых, в том числе краснокнижные, были обнаружены на территории природного парка совсем недавно (летом 2024 г.).

Природный парк был образован 29 октября 1999 г., в 2024 г. ему исполняется 25 лет. Он был первым в Свердловской области, но за эти годы приобрёл широкую известность не только в России, но и за её пределами. Так в 2022 г. парк посетило чуть более 131 тыс. чел.; в 2023 г. – около 97 тыс. чел. Конечно же, такая нагрузка не может пройти бесследно для самой природной территории. И потому в нём очередной раз поднимается вопрос о рекреационном мониторинге всей сети туристских маршрутов парка и окружающей их территории. Другими словами, необходимо постоянно следить за состоянием самих маршрутов и всех остановок на пути, регулярно проводить восстановительные мероприятия и реконструкцию наиболее посещаемых достопримечательных мест. Важным (с точки зрения устойчивости к рекреационной нагрузке) нововведением стала отсыпка щебнем практически всех троп и дорог для служебного транспорта в правобережной части парка, начало которой было положено в 2005-2008 гг.

Впервые исследования состояния туристских маршрутов на территории, тогда ещё будущего, парка «Оленьи ручьи» были проведены более 40 лет назад, когда идея создания природного парка только зарождалась и делала первые шаги. Они выражались в совместных экспедициях двух студенческих дружин по охране природы: Московского и Уральского университетов. Всего было проведено несколько летних и зимних экспедиций, составлены отчёты по проектированию на данной территории природного парка, в том числе картографическая основа: ландшафтная карта и карта функционального зонирования, написаны и успешно защищены курсовые и дипломные работы.

Летом 2023 г. в парке были проведены детальные полевые исследования состояния основных туристских маршрутов (рис. 1 / fig. 1). В работе приняли участие

как сами работники парка, так и сотрудники географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Конечной целью работ экспедиции было создание программы ежегодного мониторинга маршрутов, на основе которой можно было бы поддерживать всю их сеть в пригодном для эксплуатации состоянии в течение рекреационного сезона. Каркасом такой программы должно было стать проведение регулярных мероприятий по

восстановлению и реконструкции самого полотна тропы и наиболее посещаемых мест притяжения внимания туристов. Причём это касается не только природной составляющей (прежде всего, почвы и растительности), но и элементов благоустройства: как информационного (стенды и указатели), так и рекреационного (места отдыха, перила, ограждения и др.) и санитарного (туалеты).



Рис. 1. Экскурсионные маршруты природного парка «Оленьи ручьи». Масштаб 1:40 000 [5]

Fig. 1. Excursion routes of the "Olen'i ruch'i" Nature Park. Scale 1:40 000 [5]

Основой такой программы стала разработанная с участием одного из соавторов настоящей статьи система комплексного рекреационного мониторинга в границах ООПТ любой категории (в том числе в природных парках). Она предполагает описание этапов разработки программы мониторинга, подходы к выбору полевых методов и пространственной структуры наблюдений, а также предварительные рекомендации по проведению мероприятий для усовершенствования каждого нарушенного участка туристской тропы. Эти методические рекомендации предназначены не только для руководителей и научных сотрудников ООПТ, но и для государственных органов, осуществляющих управление и контроль в сфере заповедного дела [5].

В приложениях к указанным методическим рекомендациям содержится весьма обширный справочный и вспомогательный материал, который нуждается в некоторой адаптации при применении к решению задач по проведению рекреационного мониторинга в конкретной ООПТ.

В нашем случае, при проведении экспедиционных работ в «Оленьих ручьях», полевые методы и пространственная структура наблюдений заключалась в описании на маршрутах главным образом следующих параметров туристских троп:

- средняя ширина туристской тропы или технологической дороги для служебного транспорта;
- фракция щебня, которым отсыпан описываемый участок тропы;
- нарушенность полотна тропы, в том числе «растекание» по обочинам отсева и щебня (рис. 2 / fig.2).



**Рис. 2. Пешеходные тропы с щебневой отсыпкой**  
**Fig. 2. Pedestrian paths with crushed stone backfill [5]**

Для пространственной фиксации наблюдений и отслеживания состояния маршрута в будущем в ходе обследования проводилась запись координат «проблемных участков» с последующим нанесением их на карту. Эти данные были получены участниками полевых работ Е.О. Тарасовой и М.И. Довнер с помощью GPS-навигатора Garmin.

#### Результаты и их обсуждение

В результате исследований, проведенных по описанной выше методике, в камеральный период была проведена обработка GPS-данных, результаты которой выражены ниже в технологической таблице (табл. 1 / tabl. 1). Внесенные в неё данные не только позволяют уточнить и в дальнейшем реализовать собственно программу мониторинга, но и рекомендовать некоторые конкретные мероприятия для регулирования туристских потоков по каждому маршруту природного парка в части:

- дополнительной отсыпки щебня;
- необходимости в дополнительных информационных стендах и их содержательного (разъясняющее, предупреждающее) наполнения;
- необходимости в дополнительных или в реконструкции прежних элементов рекреационной инфраструктуры: лавочки для отдыха, перила, дополнительные ступени, туалеты, ограждения видовых площадок или опасных крутых спусков;
- участки, требующие очистки от следов старых кострищ, а также надписей туристов на скальных выступах. Методику такой очистки скал от несанкционированных надписей было предложено заимствовать у сотрудников и волонтеров национального парка «Красноярские Столбы», где её применение с успехом отработано ранее.

Таблица 1

#### Характеристика «проблемных участков», приоритетных для проведения рекреационного мониторинга

Table 1

#### The characteristics of «trouble locations» priority for recreational monitoring

<i>Название точки и объекты показа // Point name and display objects</i>	<i>Состояние, условия эксплуатации // Condition, operating conditions</i>	<i>Рекомендации по благоустройству маршрута // Recommendations for route improvement</i>
Точка № 1. Поляна «У Тимофеевны»	Поляна начала использоваться с 1991 г. Каждый год в летнее время здесь был палаточный лагерь на 20-30 чел. Перерыв в эксплуатации с 2013 г. по 2017 г. С 2018 г. каждое лето здесь был лагерь в течение 1,5 мес., численностью до 50 чел.	Не требуется
Точка № 2 Развилка маршрутов у избушки Бабы Яги	Интенсивная нагрузка на развилке туристских маршрутов. Дополнительную нагрузку создает сувенирная лавка, привлекающая туристов.	Не требуется
Точка № 3. Трехсотлетняя сосна со спилом	Точка экскурсионного рассказа и показа, объект для фотосъемки. Проблема – корневая система сосны вытаптывается, в комлевой части ствола кора частично сбита, вокруг ствола переуплотнение почвы. Видимая ширина тропы 190 см, с учетом расположения в лес 320 см. Избыток щебня.	У спила указать возраст и диаметр, установить аншлаг с надписью: «Будьте добры, не ходите, дайте корням дышать» Сделать площадку-настил «солнышко», огородить забором минимум 80 см высотой
Точка № 4. Скала Светлая, обзорная площадка	Деградация почвенного покрова, оголенность корневых систем сосен, суховершинность сосен.	Снять нагрузку с ограждения обзорной площадки, и укрепить его таким образом, чтобы неудобно было заходить за ограждение и залезать на него, рискуя жизнью.

<i>Название точки и объекты показа // Point name and display objects</i>	<i>Состояние, условия эксплуатации // Condition, operating conditions</i>	<i>Рекомендации по благоустройству маршрута // Recommendations for route improvement</i>
Точка № 5. Митрофанов лог (устье лога), старая ель	Вытопанные берега ручья, оголенная корневая система ели, нет оборудованного спуска и подъема к ручью. В сырой период очень скользко.	Сделать настил, закрывающий корневую систему старой ели; оборудовать спуск к ручью на левом берегу, оградить перилами; установить информационный аншлаг по поводу вытаптывания; сделать удобное место для набора воды.
Точка № 6. Пещера «Стоянка древнего человека»	Точка экскурсионного рассказа и показа, объект для фотосъемки. Полностью уничтожен растительный покров перед входом в пещеру. Частично уничтожен растительный покров на расположенных рядом скальных склонах. Имеются надписи и механические повреждения на скалах и возле входа в пещеру.	На площадке перед пещерой установить аншлаг о скале Дыроватый камень.
Точка № 7. Берег реки у скалы Дыроватый камень, видовая площадка	Точка экскурсионного рассказа и показа, объект для фотосъемки. Точка испытывает рекреационную нагрузку в течение всего года. Этот участок используется как место для перекуса, купания, причаливания плавсредств. Во время половодья, иногда во время паводков, заливается рекой.	Организовать площадку – причал над берегом.
Точка № 8. Лиственница канделябр	Точка экскурсионного рассказа и показа, объект для фотосъемки. Проблема – корневая система лиственницы вытаптывается, в комлевой части ствола кора частично сбрита, вокруг ствола переуплотнение почвы.	Сделать забор вокруг ствола, установить аншлаг с надписью: «Будьте добры, не ходите, дайте корням дышать»

Одним из важных способов регулирования туристского потока является определение допустимых рекреационных нагрузок. Как известно, одной из основных причин снижения качества рекреационных ресурсов при использовании ландшафтов ООПТ для туризма является значительное превышение фактического количества отдыхающих над предельно допустимым. Это приводит к отклонению геосистемы от её исходного состояния: деградации её структуры, утрате экологического и ресурсного потенциала, в том числе эстетической привлекательности и комфортности среды. А главный результат – потеря ландшафтом способности к саморегуляции и восстановлению. Процесс этот носит название рекреационной дигрессии ландшафта.

Если раньше предлагалось использовать метод нормирования допустимых нагрузок на основе изучения стадий рекреационной дигрессии для разных ландшафтов и определения порога устойчивости каждого из них, а затем удержания реальной нагрузки на допустимом уровне с помощью различных ограничений, благоустройства и планировочной организации территории, то сейчас большинство исследователей и практических работников ООПТ перешли к использованию другого метода – определения предельно допустимых изменений ландшафта [10].

Основы этого метода были разработаны в системе Службы охраны лесов Министерства сельского хозяйства США, как альтернатива методике допустимых нагрузок. И если в прежней методике основным показателем было предельно допустимое количество посетителей в единицу времени на единицу площади, то в новой методике таким показателем служит предельно возможные изменения исходных природных ландшафтов.

Согласно этому методу предложен управленческий подход – определение качества тех природных усло-

вий, которые должны сохраняться на охраняемой территории. Он заключается в планировании, в первую очередь, не количества туристов и отдыхающих, а долгосрочных целей и задач, форм и видов рекреационной деятельности, различных моделей развития туризма и отдыха. Другими словами, предложено сместить акценты с оценок уровня туристского использования к оценке приемлемого состояния природных и социальных условий.

Разработанные одним из авторов [10] основные принципы определения допустимых нагрузок при развитии туризма в ООПТ заключаются в последовательном проведении ряда мероприятий для каждого туристского маршрута:

1. Определение факторов, лимитирующих допустимую нагрузку;
2. Учёт экологических, физических и психокомфортных критериев маршрута;
3. Определение допустимой нагрузки на основе учёта перечисленных выше критериев;
4. Постепенное повышение фактических нагрузок до допустимого уровня;
5. Мониторинг каждого маршрута не реже трёх раз в год;
6. Ежегодная корректировка допустимых нагрузок в зависимости от состояния маршрута и социально-экономических условий;
7. Благоустройство туристских маршрутов как способ повышения предела устойчивости туристского маршрута к рекреационной нагрузке.

#### **Заключение**

Перечисленные выше принципы определения допустимых нагрузок при развитии туризма применимы для любых ООПТ: федеральных и региональных, крупных и относительно небольших по размеру, горных и равнинных.

При определении допустимых нагрузок в «Оленьих ручьях», прежде всего, следует учитывать принцип о благоустройстве туристских маршрутов, как способе повышения устойчивости дорожного полотна маршрута к рекреационной нагрузке. В определённом смысле данный природный парк может служить примером ООПТ, где отсыпка практически всех туристских маршрутов щебнем реально укрепила дорожное полотно маршрутов, содействовала повышению его устойчивости к рекреационным нагрузкам, а значит, и увеличила её допустимую величину.

В ранее предложенной программе эколога-рекреационного мониторинга Кавказского заповедника [4], использовался существенно больший набор показателей: ширина и глубина тропы, наличие троп-дублёров, глубина эрозионных врезов на полотне тропы, характеристики растительного покрова (проективное покрытие, видовое разнообразие и высота травостоя и другие). Однако при отсыпке полотна тропы щебнем (как в «Оленьих ручьях») ежегодный мониторинг для большинства из этих переменных перестаёт быть актуальным.

#### Сведения об авторском вкладе

В.П. Чижова – разработка проблематики и концепции работы, участие в полевых работах, подготовка первого варианта рукописи, вычитка финального варианта статьи.

А.Н. Иванов – разработка проблематики и концепции работы, вычитка финального варианта статьи.

К.С. Канаев – подготовка таблицы для рукописи, вычитка финального варианта статьи.

Е.Г. Сорокина – участие в полевых работах, вычитка финального варианта статьи.

#### Contribution of the authors

V.P. Chizhova – development of the research problems and concept, field work participation, preparation of the first manuscript edition, proofreading of the final manuscript edition.

A.N. Ivanov – development of the research problems and concept, proofreading of the final manuscript edition.

K.S. Kanaev – preparation of the table, proofreading of the final manuscript edition.

E.G. Sorokina – field work participation, proofreading of the final manuscript edition.

#### Список источников

1. *Большаков В.Н., Кузнецова И.А.* Особо охраняемые территории Свердловской области: современное состояние и принципы развития сети // Вопросы географии. Географические основы заповедного дела. Сб. 143. 2017. С. 134-143.

2. *Забелина Н.М.* Сохранение биоразнообразия в национальном парке. Смоленск: Ойкумена, 2012. 176 с.

3. Заповедные территории в 2023 году посетило более 14,5 миллиона туристов. Пресс-релиз Министерства природных ресурсов РФ о посещаемости ООПТ федерального значения в 2023 г. URL: [https://www.mnr.gov.ru/press/news/zapovednye\\_territorii\\_v\\_2023\\_godu\\_posetilo\\_bolee\\_14\\_5\\_milliona\\_turistov/](https://www.mnr.gov.ru/press/news/zapovednye_territorii_v_2023_godu_posetilo_bolee_14_5_milliona_turistov/) (дата обращения 26.09.2024).

4. *Иванов А.Н., Сафронова А.А., Чижова В.П.* Оценка рекреационного воздействия и дигрессии ландшафтов на основных туристических маршрутах Кавказского заповедника // Региональные геосистемы. 2023. № 4. С. 507-517. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-507-517>

5. Карты. Оленьи ручьи. URL: <https://olenpark.ru/maps> (дата обращения: 26.09.2024).

6. *Непомнящий В.В., Завадская А.В., Чижова В.П.* Методические рекомендации по организации системы комплексного рекреационного мониторинга на особо охраняемых природных территориях. Новосибирск, Наука. 2021. 136 с.

7. *Стишов М.С., Троицкая Н.И.* Организация экологического мониторинга на особо охраняемых природных территориях. М.: ВВФ России, 2017. 139 с.

8. *Туменова С.А., Жерукова А.Б.* Устойчивый туризм на особо охраняемых природных территориях. Нальчик: Принт Центр, 2019. 168 с.

9. Физико-географическое районирование и ландшафты Свердловской области / под ред. О.Ю. Гурьевских. Екатеринбург: ФГБОУ ВО Урал. гос. пед. ун-т, 2016. 280 с.

10. *Чижова В.П.* Рекреационные ландшафты: устойчивость, нормирование, управление. Смоленск: Ойкумена, 2011. 176 с.

11. *Eagles P.F.J., McCool S.F.* Tourism in National Parks and Protected Areas: Planning and Management. Wallingford: CABI, 2002. 320 p. <https://doi.org/10.1079/9780851995892.0000>

12. *Newsome D., Moore S.A., Dowling R.K.* Natural Area Tourism: Ecology, Impacts and Management (2nd ed.). Bristol, UK, Channel View, 2013. 206 p.

#### References

1. Bol'shakov, V. and Kuznecova, I., 2017. Osobo ohranjaemye territorii Sverdlovskoj oblasti: sovremennoe sostojanie i principy razvitiya seti [Protected areas of the Sverdlovsk region: current state and principles of network development]. *Voprosy geografii. Geograficheskie osnovy zapovednogo dela*, pp. 134-143. (in Russian)

2. Zabelina, N., 2012. *Sohranenie bioraznoobrazija v nacional'nom parke* [Biodiversity conservation in a national park]. Smolensk, Ojkumena publ. 176 p. (in Russian)

3. More than 14.5 million tourists visited the protected areas in 2023. Press-release of the Ministry of Natural Resources of the Russia about federal protected areas visitors' number in 2023. Available from: [https://www.mnr.gov.ru/press/news/zapovednye\\_territorii\\_v\\_2023\\_godu\\_posetilo\\_bolee\\_14\\_5\\_milliona\\_turistov/](https://www.mnr.gov.ru/press/news/zapovednye_territorii_v_2023_godu_posetilo_bolee_14_5_milliona_turistov/) [Accessed 26th September 2024]. (in Russian)

4. Ivanov, A., Safronova, A. and Chizhova, V., 2023. Ocenka rekreacionnogo vozdejstvija i digressii landshaftov na osnovnyh turisticheskix marshrutah Kavkazskogo zapovednika [Assessment of recreational impact and landscape degradation on the main tourist routes of the Caucasus Reserve]. *Regional'nye geosistemy*. 47(4), pp. 507-517. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2023-47-4-507-517> (in Russian)

5. Maps. Olen'i ruch'i. Available: <https://olenpark.ru/maps> [Accessed 26th August 2024]. (in Russian)

6. Nepomnjashhij, V., Zavadskaja, A. and Chizhova, V., 2021. *Metodicheskie rekomendacii po organizacii sistemy kompleksnogo rekreacionnogo monitoringa na osobo ohranjaemyh prirodnyh territorijah* [Methodical recommendations on the organization of the system of complex recreational monitoring in protected areas]. Novosibirsk, Nauka. Publ. 136 p. (in Russian)
7. Stishov, M. and Troickaja, N., 2017. *Organizacija jekologicheskogo monitoringa na osobo ohranjaemyh prirodnyh territorijah* [Organization of environmental monitoring in protected areas]. Moscow, WWF of Russia publ. 139 p. (in Russian)
8. Tumenova, S. and Zherukova, A. 2019. *Ustojchivyy turizm na osobo ohranjaemyh prirodnyh territorijah* [Sustainable tourism on protected territories]. Nal'chik, Print Centr publ, 2019. 168 p. (in Russian)
9. Gur'evskih O. (ed.), 2016. *Fiziko-geograficheskoe rajonirovanie i landshafty Sverdlovskoj oblasti: monografija* [Physico-geographical zoning and landscapes of the Sverdlovsk region: a monograph]. Ekaterinburg, Ural. gos. ped. un-t publ. 280 p. (in Russian)
10. Chizhova, V., 2011. *Rekreacionnye landshafty: ustojchivost', normirovanie, upravlenie* [Recreational landscapes: sustainability, normalization, management]. Smolensk, Ojkumena publ. 176 p. (in Russian)
11. Eagles, P. and McCool, S., 2002. *Tourism in National Parks and Protected Areas: Planning and Management*. Wallingford, Cabi Publishing. 320 p. <https://doi.org/10.1079/9780851995892.0000>
12. Newsome, D., Moore, S. and Dowling, R., 2013. *Natural Area Tourism: Ecology, Impacts and Management* (2nd ed.). Bristol, Channel View. 206 p.

Статья поступила в редакцию 05.10.2024; одобрена после рецензирования 09.10.2024; принята к публикации 06.11.2024.

The article was submitted 05.10.2024; approved after reviewing 09.10.2024; accepted for publication 06.11.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья

 УДК 550.42 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-20-41> EDN IXEVYW**Современные представления о влиянии техногенеза на геохимические особенности почв: обзор****Екатерина Алексеевна Дзюба**

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

[aea\\_eco@mail.ru](mailto:aea_eco@mail.ru)

**Аннотация.** В статье представлен научный обзор современных представлений о геохимических исследованиях в России и мире. Отдельно представлены известные данные о влиянии техногенеза на геохимические особенности почв. Представлены основные теоретические представления в области геохимических исследований территорий с упоминанием В.И. Вернадского, В.М. Гольдшмидта, А.Е. Ферсмана, А.А. Саукова, Ф.У. Кларка, А. Кабаты-Пендиас, А.И. Перельмана, А.П. Виноградова, М.А. Глазовской, Н.С. Касимова, Б.Б. Польшова, А.Б. Ронина, Ю.Е. Саета. Описаны основные классификации макро- и микроэлементов, которые применяются в геохимии. Проанализированы данные об общем влиянии техногенеза на распределение химических элементов в окружающей среде. Отдельно дан анализ влиянию нефтяного загрязнения на распределение химических элементов почв; влиянию добычи калийных солей; влиянию добычи каменного угля и ликвидации угольных шахт. Приведены данные о характерных химических элементах, которые накапливаются в почвах в зонах влияния добычи нефти, калийных месторождений и добычи угля. Описаны подходы по эколого-геохимическому районированию территорий и проведен обзор геохимических исследований в Пермском крае.

**Ключевые слова:** геохимия, добыча калийных солей, добыча нефти, добыча угля, Кизеловский угольный бассейн, Пермский край, почва, районирование, региональный геохимический фон, техногенез, тяжелые металлы

**Для цитирования:** Дзюба Е.А. Современные представления о влиянии техногенеза на геохимические особенности почв: обзор // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 20-41. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-20-41>. EDN IXEVYW.

## SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

**Technogenesis influence on a geochemical features of soils: review of modern concepts****Ekaterina A. Dziuba**

Perm State University, Perm, Russia

[aea\\_eco@mail.ru](mailto:aea_eco@mail.ru)

**Abstract.** The article presents a scientific review of modern ideas about geochemical research in Russia and the world. The known data on the influence of technogenesis on geochemical features of soils are presented separately. The main theoretical ideas in the field of geochemical studies of territories are presented with mentioning V.I. Vernadsky, V.M. Goldschmidt, A.E. Fersman, A.A. Saukov, F.W. Clark, A. Kabaty-Pendias, A.I. Perelman, A.P. Vinogradov, M.A. Glazovskaya, N.S. Kasimov, B.B. Polynov, A.B. Ronov, Y.E. Saet. The main classifications of macro- and microelements, which are used in geochemistry, are described. The data on the general influence of technogenesis on the distribution of chemical elements in the environment are analysed. The influence of oil pollution on the distribution of chemical elements in soils; the influence of potassium salt mining; the influence of coal mining and liquidation of coal mines is analysed separately. The data on characteristic chemical elements, which accumulate in soils in zones of influence of oil extraction, potash deposits and coal mining, are given. Approaches to ecological and geochemical zoning of territories are described and a review of geochemical studies in Perm Krai is given.

**Keywords:** geochemistry, potassium salt mining, oil mining, coal mining, Kizelovsky coal basin, Perm region, soil, zoning, regional geochemical background, technogenic, heavy metals

**For citation:** Dziuba, A., 2024. Technogenesis influence on a geochemical features of soils: review of modern concepts. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 20-41. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-20-41>. EDN IXEVYW. (in Russian)

Несмотря на достаточно молодой возраст геохимии как науки, в ней накоплен большой объем данных фундаментальных и прикладных исследований. Отдельное место занимает изучение геохимических особенностей почв. Далее более подробно будут описаны актуальные теоретические представления о геохимических исследованиях территорий, представления о геохимии макро- и микроэлементов, о влияние техногенных процессов на распределение элементов. Отдельно будут выделены добыча нефти, калийных удобрений и каменного угля, и их влияние на геохимические особенности почв. Будут описаны подходы к эколого-геохимическому районированию территорий и обзор исследований на территории Пермского края.

### **Теоретические основы геохимических исследований территорий**

Большой вклад в развитие геохимии принесли такие ученые, как В.И. Вернадский, В.М. Гольдшмидт, А.Е. Ферсман, А.А. Сауков, Ф.У. Кларк, А. Кабата-Пендиас, А.И. Перельман, А.П. Виноградов, М.А. Глазовская, Н.С. Касимов, Б.Б. Полюнов, А.Б. Ронов, Ю.Е. Сает и другие. Основной проблемой исследования в геохимии была и остается проблема миграции химических элементов, изучение закономерностей аккумуляции и рассеивания веществ. В ходе изучения факторов, которые оказывают влияние на геохимические процессы, высокую роль играет учет кларков элементов.

А.И. Перельман [82] выделяет основные направления геохимии, к которым относится геохимия процессов, геохимия систем и геохимия элементов. Е.П. Янин [108] выделяет установление закономерностей поведения химических элементов в геосферах Земли, как основную теоретическую проблему геохимии, которая решается выполнением следующих задач [108]:

– исследование распространенности химических элементов и определение среднего состава земной коры;

– установление закономерностей распределения элементов и их изотопов в Земле в целом, ее геосферах, горных породах, рудах, минералах, почвах, водах, живых организмах;

– изучение миграции химических элементов, приводящей к их концентрированию или рассеянию, образованию горных пород и минералов, геохимических провинций, месторождений полезных ископаемых и связанных с ними геохимических ореолов и потоков рассеяния;

– установление закономерностей изменения химического состава окружающей среды (биосферы и ее составных частей) в условиях техногенного воздействия.

Принцип историзма, который основан на изучении эволюции миграции элементов за период геологической истории, особенностей состава геосфер Земли прошлых геологических эпох, геохимических факторов возникновения и развития жизни и среды ее обитания, является важнейшим методологическим принципом в геохимии [108].

Фактический материал геохимии – это количественные данные о содержании и распределении хими-

ческих элементов и их изотопов в различных компонентах, о формах нахождения элементов и их поведения в природных и техногенных системах [108].

Методической основой геохимических исследований являются проведение природной характеристики территории и ее компонентов, применение современных физических, физико-химических и химических методов (в том числе для определения содержания элементов), а также математические и статистические методы обработки данных [108]. Несмотря на то, что приведенные методы стали основой для проведения геохимических исследований, данные методы не являются собственно геохимическими, геохимия заимствует их из других наук. В рамках развития научного знания и подходов по изучению геохимических особенностей территории в геохимии были выработаны и собственные методы исследования [108]:

– метод глобальных геохимических констант (кларков химических элементов);

– изучение механизма формирования и химической эволюции земной коры на основе представлений о геохимических циклах с учетом принципиальной роли живого вещества;

– геохимическое картирование и районирование;

– методы физико-химического анализа парагенезиса химических элементов;

– метод анализа изменений в геологических процессах соотношений содержания близких по геохимическим свойствам элементов и особенно изотопов.

Во многом геохимия изучает именно распределение химических элементов в компонентах природной среды. Изучение микроэлементов в почвах имеет длительную историю. Появление сведений о микроэлементах в природных средах относится к концу XIX в. – началу XX в. В 1872 г. К.А. Тимирязев впервые доказал необходимость цинка для высших растений, в 1897 г. французский ученый Г. Бертран определил микроэлементы как химические элементы, которые необходимы для живых организмов и присутствуют в природных средах в микроколичествах. К середине XX столетия биохимики и физиологами были получены экспериментальные доказательства участия микроэлементов в важнейших ферментативных и обменных процессах в живых организмах, в том числе и человека [1, 107].

В 1889 г. Ф.У. Кларком впервые было сделано обобщение данных по химическому составу горных пород. Позже, собственные кларки были предложены А.Е. Ферсманом [99], В.М. Гольдшмидтом [120], А.П. Виноградовым [19], С.Р. Тейлором [145], К.Г. Ведеполем [148], А.А. Беусом и др. [8], Д.М. Шоу и др. [142], С. Гао и др. [118, 122], Р.Л. Рудник и С. Гао [139], Н.А. Григорьев [33].

Исследования в области геохимии и почвоведения [17-23, 29-31, 38-41, 47, 48, 52-54, 96] выявили географические закономерности и региональные особенности изменения содержания микроэлементов в горных породах, почвах, растениях [51].

Г.В. Мотузова [69] обобщая современные знания о микроэлементах, выделяет ряд сформированных в эко-

логической геохимии парадигм. Ее обобщение заключается в том, что, во-первых, самым значимым фактором в накоплении элементов в почвах является элементный состав пород. Относительно верхнего почвенного горизонта, в частности органогенного, помимо состава подстилающих пород, влияние оказывают биогеохимические процессы. При условии техногенеза на конкретной территории именно он становится преобладающим по влиянию фактором. Миграция в радиальном и латеральном направлениях является причиной дифференциации почвенного профиля и геохимических ландшафтов. Микроэлементы, находящиеся в почвах, входят в состав различных соединений, и могут быть изучены в валовой и подвижных формах. Изучение подвижных форм актуально при изучении миграции элементов в сопредельные среды, при изучении же средних содержаний актуально изучение валовой формы.

### Геохимия микро- и макроэлементов

Почвы являются природными накопителями тяжелых металлов в окружающей среде и основным источником загрязнения сопредельных сред, включая высшие растения. Тяжелые металлы находятся в почве в виде различных химических соединений. В почвенном растворе они присутствуют в форме свободных катионов и ассоциатов с компонентами раствора. В твердой части почвы они находятся в форме обменных катионов и поверхностных комплексных соединений, в виде примесей глинистых минералов, в форме собственных минералов, устойчивых осадков малорастворимых солей [50].

Аккумуляция и миграция тяжелых металлов в почвах естественных ландшафтов определяется типом почвообразования. А.П. Виноградов [22] и Г.В. Добровольский [40] утверждают, что около 50% всего количества тяжелых металлов, находящиеся в твердой фазе почвы, связаны гидроксидом железа. Часть тяжелых металлов прочно связана с глинистыми минералами, а обменные формы, связанные как с минералами, так и с органическим веществом, составляют малую часть от общей массы тяжелых металлов в профиле почв.

К тяжелым металлам относятся свыше 40 химических элементов таблицы Менделеева с атомными массами, превышающими 50 атомных единиц, или химические элементы с удельным весом выше 5 г/см<sup>3</sup>. Не все тяжелые металлы представляют одинаковую опасность для живых организмов. По токсичности и способности накопления более десяти элементов признаны приоритетными загрязнителями биосферы. Среди них выделяют: ртуть, свинец, кадмий, медь, олово, цинк, молибден, кобальт, никель [50].

К циклическим элементам В.И. Вернадский относит те, которые участвуют в различных геохимических циклах. Выделение группы циклических элементов

удобно в рамках исследований по экологической геохимии [2].

Основными источниками загрязнения почв опасными тяжелыми элементами являются [24]:

- 1) аэральные выпадения из стационарных источников и средств передвижения;
- 2) гидрогенное загрязнение при поступлении промышленных сточных вод в водоемы;
- 3) осадки сточных вод;
- 4) отвалы золы, шлака, руд, шламов и т.п.;
- 5) разливы нефти и солевых растворов в местах нефтедобычи.

Классификации химических элементов проводились многими учеными. Одной из наиболее известных является классификация В.М. Гольдшмидта. Выделенные им группы элементов в значительной мере отражают их преимущественное накопление в определенных слоях (сферах) Земли. Ученый установил связь элементов, преобладающих в каждой из выделенных им геосфер, с величинами атомных объемов элементов [2].

Элементы, характеризующие каждую из сфер, располагаются в определенных частях кривой атомных объемов (восходящие и нисходящие ветви, вершины и т.д.). В.М. Гольдшмидтом были выделены элементы [2]:

- атмофильные (благородные газы, N);
- литофильные (Na, Mg, Al, Si, K, Ca и др.);
- халькофильные (Cu, Zn, Ag, Pb, Hg, As и др.);
- сидерофильные (Fe, Co, Ni, платиноиды).

Первые концентрируются преимущественно в атмосфере, вторые – в каменной оболочке, третьи подобны меди и образуют сульфиды, четвертые подобны железу. Предполагаемая первоначально связь элементов с определенными сферами не имеет четких закономерностей, однако названия групп элементов сохранились. Стоит отметить, что многие элементы могут относиться сразу к нескольким группам [2].

Более дробное и обоснованное разделение элементов на отдельные группы характеризует классификацию В.И. Вернадского (табл. 1 / tabl. 1), в которой элементы разделены на шесть групп. В первую (благородные газы) и вторую (благородные металлы) группы объединены 12 элементов, для которых характерно существование преимущественно в самородном состоянии, а, следовательно, они не характерны для целого ряда геохимических циклов. К третьей группе (циклические элементы) отнесено наибольшее число элементов – 44, все они участвуют в различных геохимических циклах. В четвертую группу объединены 11 элементов, для которых в литосфере наиболее характерно состояние рассеяния. В пятой группе находятся 7 сильно радиоактивных элементов, в шестой – 15 элементов редких земель [2].

Таблица 1

Геохимические группы элементов (по данным В.И. Вернадского) [2]

Table 1

Geochemical group of elements (by V.I. Vernadsky) [2]

Геохимическая группа // Geochemical group	Элементы // Elements	n
Благородные газы // Noble gases	He, Ne, Ar, Kr, Xe	5
Благородные металлы // Noble metals	Ru, Rh, Pb, (Os), Ir, Pt, Au	7
Циклические элементы // Cyclic elements	H, Be, B, C, N, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, (Cr), Mn, Fe, Co, (Ni), Cu, Zn, (Ge), As, Se, Sr, (Zr), Mo, Ag, Cd, (Sn), Sb, (Te), Ba, (Hf), (W), (Re), (Hg), (Tl), (Pb), (Bi)	44
Рассеянные элементы // Trace elements	Li, Sc, Ga, Br, (Rb), Y, (Nb), In, I, Cs, Ta	11
Радиоактивные элементы // Radioactive elements	Po, Rn, Ra, Ac, Th, Pa, U	7
Редкоземельные элементы // Rare-earth element	La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	15

Классификация В.И. Вернадского более удобна, чем ранее рассмотренная, для использования в экологической геохимии. Этому особенно способствует выделение групп циклических, радиоактивных и рассеянных элементов [2].

Еще более применимой должна стать при изучении биосферы и ноосферы классификация элементов А.И. Перельмана, по особенностям гипергенной миграции. В основу этой классификации положены наиболее характерные особенности миграции химических элементов в биосфере и их способность концентрироваться на определенных геохимических барьерах [2].

В геологии довольно часто также используют классификации химических элементов А.Е. Ферсмана и А.Н. Заварицкого, которые приводятся в большинстве учебников по геохимии [2].

#### Влияние техногенеза на распределение макро- и микроэлементов

В понимании А.Е. Ферсмана [108] техногенез является полиэлементным источником загрязнения и приводит к формированию в окружающей среде аномальных геохимических полей (техногенных геохимических аномалий), фиксируемых для химических элементов с высокой технофильностью, повышенной токсичностью, высоким уровнем биопоглощения и обладающих выраженной биоактивностью [108].

По данным Ю.Е. Саета и др. [87] ежегодно со всеми видами отходов в крупных городах в природную среду попадают около 5 тыс. т Zn, по 2 тыс. т Cu и Cr, 1100 т

Pb, по 300 т Ni, Sb, W, около 50 т Cd и Mo, около 50 т Cd и Mo, около 50 т Ag и др. [87].

По В.И. Вернадскому (положение о ведущей геохимической роли живого вещества) критерием загрязненности или незагрязненности территории является состояние живых организмов, а в частности территория не загрязнена, если [30]:

- Не нарушаются газовые, концентрационные и окислительно-восстановительные функции живого вещества системы, регулирующие геохимическое самоочищение системы;

- Биохимический состав первичной и вторичной продукции не изменяется настолько, чтобы вызвать нарушение жизненных функций в каком-либо из звеньев пищевых цепей не только данной системы, но и за ее пределами (при отчуждении биологической продукции);

- Не понижается биологическая продуктивность системы;

- Не понижается информативность системы: сохраняется необходимый для существования системы генофонд;

При нарушении приведенных выше параметров, согласно В.И. Вернадскому, происходит техногенная трансформация природной среды, вплоть до разрушения [30]. С целью оценки влияния техногенеза на изменение геохимических свойств территорий Н.П. Солнцевой была составлена классификация техногенных факторов [30], представленная на рис. 1 / fig. 1.

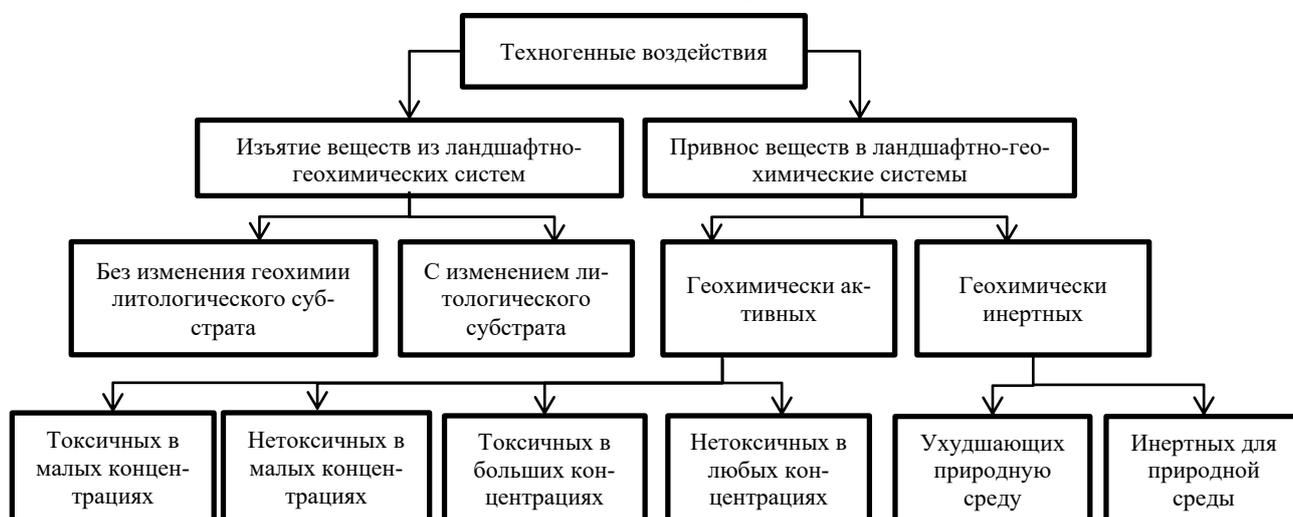


Рис. 1. Классификация техногенных факторов по Н.П. Солнцевой [30]

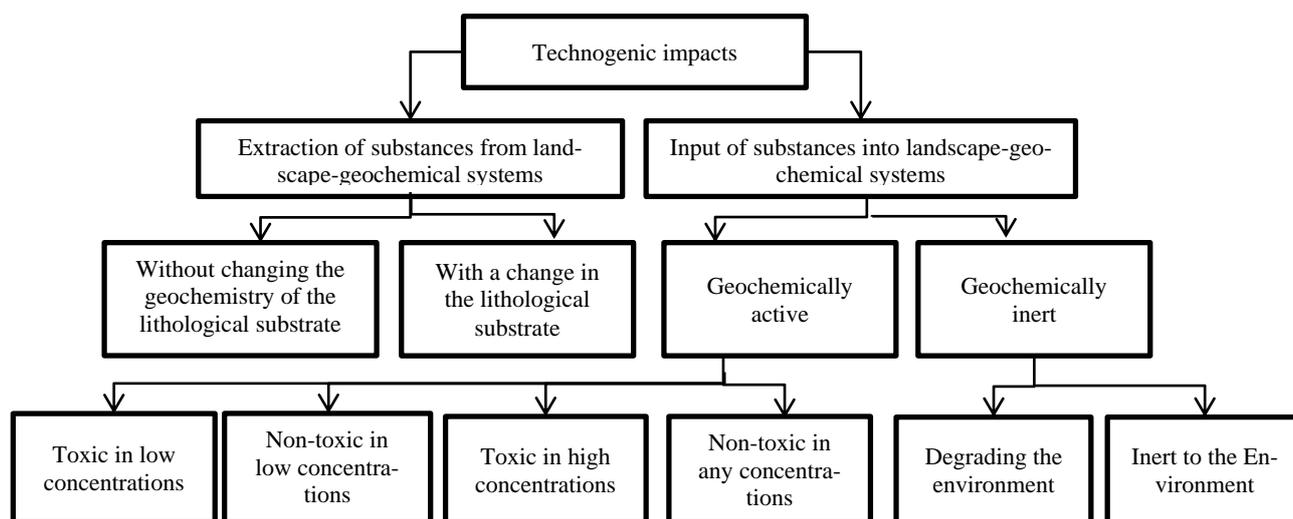


Fig. 1. Classification of technogenic factors by N.P. Solntseva [30]

### Влияние нефтяного загрязнения на распределение макро- и микроэлементов

Загрязнение тяжелыми металлами происходит в ходе попадания в почву вместе с разлитой нефтью и солевыми растворами в местах нефтедобычи. Кроме прямого поступления нефти и солевых растворов, рассматривают загрязнение сопутствующими тяжелыми металлами. Их попутное поступление в почву усугубляет негативное влияние углеводородов и минеральных солей, тормозя процесс естественного самовосстановления почвы [24]. В результате освоения нефтяных месторождений происходит геомеханическое воздействие на почвы и растений [74]. Под влиянием объектов инфраструктуры нефтегазовых промыслов наблюдается локальное загрязнение поверхностных горизонтов почв [78].

Основная проблема при загрязнении нефтью – развитие «битумогенеза», то есть образование на поверхности торфа битумной корки, блокирующей произрастание растительности. Применяемое при ремедиации искусственное окисление нефти часто бывает малоэффективным в силу различных причин, в том числе из-за токсического действия компонентов нефти (тяжелых металлов и других веществ), попадающих на поверхность вблизи мест нефтедобычи [24]. При этом увеличивается биологическая доступность ряда тяжелых металлов [131].

На территориях нефтяных месторождений преобладающими веществами группы полиароматических углеводородов являются низкомолекулярные соединения – нафталин (12%), фенантрен (23%) и флуорантен (16%), что связано с загрязнением легкой нефтью в результате бурения скважин [79]. Основными показателями загрязнения отходами бурения при нефтедобыче являются высокие концентрации Sr, Ba, нефтяных углеводородов и ионов Cl [132].

Установлено, что в составе нефти всегда присутствуют два тяжелых металла: Ni и V [81]. Так же выявляются и другие тяжелые металлы: Cr и Zn [83]. В местах добычи нефти почвы загрязняются также компонентами минерализованных промышленных стоков, буровых растворов и шламов [49]. В шламовые амбары поступают хлоридно-кальциевые рассолы, обогащенные Fe, Mn, Pb, Sn, Zn, Cu, Ba [42, 106].

Загрязнение в районах нефтедобычи зависит от типа почв. В минеральных почвах с высоким фоновым содержанием металлов превышение фона, часто, оказывается незначительным [117], но торфяные почвы с низким фоновым содержанием тяжелых металлов загрязняются гораздо сильнее. С нефтью, пластовыми водами и буровыми растворами в торфяные почвы могут поступать V, Ba, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr, Zn [4]. Содержание многих из них многократно увеличивается в золе выживших растений [92]. По данным М.Г. Опекунной и др. [76] основными индикаторами нефтяного загрязнения являются повышенные концентрации в почвах Ba, Hg, Zn, Cu, Pb и нафталина одновременно в торфянистых и минеральных горизонтах. Для территорий в зоне влияния нефтедобычи характерно накопление Mn, Ni, Sr, Pb и Zn [35, 37].

С течением времени органические компоненты нефти окисляются, и их доля в почве снижается (хотя часто очень медленно, возможно, из-за влияния сопутствующих тяжелых металлов). Если они не вымываются и не поступают в водотоки и водоемы, то могут подавлять развитие биоты и ингибировать рост растительности неопределенно долго [25]. Наиболее чувствительно на воздействие со стороны объектов добычи углеводородов реагирует растительность, в противопоставление почве и водным объектам [80].

В Пермском крае выделяют несколько источников заполнения карстовых полостей нефтью [61, 62, 65, 68, 72, 73, 83, 84]: аварийные разливы нефти на поверхности в карстовые воронки, захоронение отходов в виде слива нефтепродуктов и сточных вод в карстовые воронки. Крупным источником поступления нефти в зону открытого карста является подъем пластовой жидкости по трещинам в горных породах из нефтяной залежи при повышении давления в пласте, а также при разгерметизации обсадных колонн в скважинах [85].

Установлено, что районы развития карстовых образований и присущие им водотоки обладают специфической, способствующей более интенсивному распространению загрязнения [135, 146]. Доказано, что в случае нефтяного загрязнения, ситуация усложняется меняющимся в ходе миграции составом компонентов нефти, растворимостью и адгезией к породам [91]. Районы

развития карста отличаются существенным снижением степенью защищенности подземной гидросферы [67] и имеют ряд особенностей, которые создают особые условия для распространения нефтяного загрязнения. Зона аэрации в таких районах отличается крайне высокой проницаемостью из-за значительной трещиноватости, наличия поноров, воронок, котловин и других карстовых форм. Пустотность массива может достигать 30% и более. Поверхностный сток и, соответственно, загрязнители в таких случаях практически беспрепятственно инфильтруются в массив, загрязняя подземные воды. При значительных утечках нефти трещиноватые зоны и полости могут являться коллекторами нефти и способствовать формированию своеобразных техногенных месторождений [68]. При отсутствии покровных отложений, роль которых в предотвращении загрязнения подземных вод весьма высока, атмосферные осадки, а также проливы, разливы, в том числе нефти практически беспрепятственно поглощаются поверхностными карстовыми формами [68].

Выделяются элементы, содержание которых обусловлено именно нефтяным загрязнением. В данном случае достаточно универсальным для всех природных зон считается Sr [132], а также говорят о загрязнении почв V, Ni, Cr, As, Ti [7, 24] (условно к ним добавляют Pb и Zn). При оценке распространения загрязнения вокруг месторождения актуальным является содержание Zn и Pb [28]. Ni и Cd относят к металлам, которые присутствуют в составе нефти, а значит являются важными для мониторинга нефтезагрязненных территорий [97].

#### **Влияние добычи калийных солей на распределение макро- и микроэлементов в почвах**

Россия, наряду с Канадой, Белоруссией, Китаем и Германией, является лидером по добыче и производству калийных солей, доля в мировых запасах составляет 22%. В промышленных объемах добыча калийных солей в Российской Федерации ведется только на ВКМС, в Пермском крае.

Добыча и производство калийных солей оказывает негативное воздействие на окружающую природную среду. Это воздействие проявляется в нарушении геолого-структурного строения подрабатываемой территории [5], образовании большого объема отходов [103], загрязнении поверхностных и подземных вод [111], трансформации почвенно-растительного покрова [100], вплоть до образования солончаков [43].

Образование отходов в ходе разработки месторождений ведет к образованию солеотвалов (терриконов) с рассолосборниками и шламохранилищ, которые, в свою очередь, являются нестационарными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Также загрязняющие вещества поступают в поверхностные и подземные воды [60] (со стоками с солеотвалов), в почвы [124] (в результате чего происходит засоление почв). Отходы представлены легкорасщепляемыми компонентами (хлоридами калия, натрия и магния) и содержат большое количество потенциально токсичных элементов (Sr, Mn, Ni, Co, Cr, Zn и др.), а также реагентов, используемых для обогащения полезных ископаемых [60]. В работе [11, 37] приведены данные о том, что в почвах территорий, находящихся в

зоне влияния добычи калийных солей, происходит накопление Co, Zn, Mn, Sr, V, Cr и Fe.

Помимо загрязнения, актуальной для данной территории является воздействие на недра [130]. Из-за большого объема изъятия пород возникают пустоты и происходят провалы, которые представляют опасность для людей, проживающих на данной территории. Суммируя все проблемы, возникающие при добыче калийных солей, можно сделать вывод, что в результате происходит антропогенная трансформация природной среды, которая ведет к значительному ухудшению состояния окружающей среды.

Важной частью антропогенной трансформации природной среды является изменение геохимических свойств почвенного покрова [3]. Оно выражается в аккумуляции элементов в концентрациях, превышающих фоновое содержание, и в рассеивании элементов, содержание которых естественно для данной территории. Изменение геохимических особенностей территории в результате добычи калийных солей, подверженной засолению, отмечаются в долине Верхнего Рейна и в целом характерны для стран Европы [114]. Наибольший интерес, в данном случае, представляют потенциально токсичные элементы, загрязнение которыми в конечном итоге влияет на здоровье населения.

#### **Влияние добычи каменного угля и ликвидации добычи на распределение макро- и микроэлементов**

Для многих стран горнодобывающая промышленность и переработка полезных ископаемых имеют важное значение. Но в то же время эти отрасли хозяйственной деятельности связаны с огромными проблемами управления потенциально разрушительными воздействиями на окружающую среду [140]. Горнодобывающая деятельность вносит серьезные изменения в ландшафты, следовательно, и в землепользование [137]. Помимо негативного воздействия на окружающую среду, в ряде исследований отмечают серьезное влияние на здоровье населения [121, 129].

Известно, что территории месторождений полезных ископаемых являются геохимическими аномалиями. Это относится и к месторождениям каменного угля. Проявление техногенеза свойственно и для угольных месторождений. В процессе добычи угля оказывается воздействие на поверхностные и подземные водные объекты, почвы, растительные сообщества [112], происходит изменение ландшафтов и экосистем [137], то есть происходит техногенная трансформация природной среды.

Воздействия на окружающую среду происходят, как во время эксплуатации месторождений, так и после их ликвидации [125]. В период эксплуатации месторождений проводится контроль состояния окружающей среды, многие процессы регулируются. В результате данных действий оказываемое воздействие становится более предсказуемым. После ликвидации месторождения увеличивается риск возникновения неконтролируемых процессов, которые обуславливают посттехногенную трансформацию природной среды [137].

Проблема техногенеза на территориях, функционирующих и заброшенных угольных шахт актуальна для многих регионов мира. Большая часть исследований в этой области акцентирована на негативное воздействие относительно поверхностных и подземных водных

объектов. Именно этим проблемам посвящены исследования в Словакии [116], Зимбабве [140], Испании [137], Марокко [121, 129], Китае [150], России [115].

Большой интерес для нас представляют исследования геохимических особенностей почв в районах воздействия заброшенных горнодобывающих районов. Для Донецкого угольного бассейна остро стоит проблема загрязнения почв металлами с терриконов [46, 104]. Это является результатом происходящей ветровой и водной эрозии. Но помимо воздействия функционирующих угольных шахт, в Донецком угольном бассейне существует проблема последствий ликвидации части шахт [32]. Основными факторами негативного воздействия на окружающую среду, в результате ликвидации ряда месторождения авторы считают [32]: подтопление, обрушение земной поверхности, деградацию земель (засоление, заболачивание, загрязнение металлами). Но самое серьезное последствие – это наличие хранилищ отходов угледобычи. Проблема заключается в том, что они являются причиной газопылевого загрязнения окружающей среды.

По данным А.Ю. Опекунова и др. [75] горнопромышленное производство приводит к существенному загрязнению окружающей среды рудными (Cu, Zn) и сопутствующими (Cd, Fe, Pb) металлами.

В некоторых регионах имеется опыт рекультивации территорий влияния посттехногенной трансформации природной среды в результате ликвидации угольных месторождений. В Бразилии имеется довольно успешный опыт рекультивации таких территорий [113]. Но, по словам авторов, полное восстановление компонентов природной среды остается невозможным.

Проблема изучения последствий ликвидации угольных месторождения актуальна и для России. На территории Западного Урала расположен Кизеловский угольный бассейн (далее – КУБ), который эксплуатировался с 1797 г. Сейчас наблюдается техногенная и посттехногенная трансформация природной среды, возникшая в результате ликвидации угольных шахт [63]. Несмотря на то, что добыча угля прекращена, на территории КУБа сложилась ситуация, которую считают региональной экологической катастрофой [125].

В изучении данной территории сохранился мировой тренд, связанный с большей изученностью влияния на водные объекты. Имеется достаточное число исследований, связанных с оценкой влияния на подземные и поверхностные водные объекты [64, 125, 136]. А также работы, посвященные разработке путей решения проблем загрязнения вод [64]. Загрязнение подземных и поверхностных вод произошло по причине затопления шахт [65]. Реки, подвергнутые загрязнению, имеют ярко оранжевый цвет, что можно увидеть на спутниковых снимках. В химическом составе рек присутствует разбавленная серная кислота. Ранее геохимические особенности ландшафтов на территории влияния КУБа изучали Н.П. Солнцева и Е.М. Никифорова [70, 71, 93, 94]. В своих исследованиях они изучали техногенные потоки, формируемые в результате угледобычи.

Геохимическим особенностям почвенного покрова не уделялось такого внимания со стороны научного сообщества. Процессы, происходящие сейчас на территории КУБа, значительно влияют на все компоненты

природной среды, и, это влияние отражается в изменении распределения элементов в почве. В данном случае, наибольшее значение будут иметь следующие виды негативного воздействия: атмосферный перенос поллютантов, создание терриконов, механогенез, перемена грунтов.

Почвенная среда оказывает большое влияние на здоровье человека [121], что в свою очередь определяет важность исследования загрязнения почв. Почва является буферной средой, принимая в себя потоки миграции из других компонентов природной среды: атмосферного воздуха, водных объектов, растительности и животного мира. Геохимический состав почв на конкретной территории отражает природные особенности и техногенную нагрузку [3, 98]. Изучение валового содержания макро- и микроэлементов позволяет выявить особенности накопления и рассеивания элементов [36, 115], которые были сформированы в результате техногенной и посттехногенной нагрузки, и, оценить степень загрязнения почв. При оценке рассеивания и накопления элементов необходимо учитывать кларки [51] и региональное фоновое содержание химических элементов. В работе [37, 115] приведены данные, что для таких территорий характерно накопление Co, Ni, Mn, Cr, As, Zn, V, Ti и Pb.

При изучении влияния техногенеза актуально использование ГИС-технологий [15, 89], в том числе для выявления пространственных последствий добычи угля. Так ученые из Китая провели оценку последствий экстенсивной добычи угля на природную среду города Цзяванг, в котором на протяжении многих десятилетий ведется добыча угля [112]. Применение ГИС-технологий позволяет проводить анализ пространственного распределения химических элементов [121], оценивать степень трансформации природной среды [89] и выявлять риски для здоровья населения [141, 149]. Например, для изучения загрязнения металлами в районе заброшенных угольных шахт в США исследователи применили методы кокринга и крининга для пространственной интерполяции содержания металлов в почве [127]. Они пришли к выводу, что разработка моделей пространственной регрессии и учет физико-химических свойств почв повышает точность пространственной интерполяции металлов. Изучение пространственного распределения металлов в Китае сопровождалось применением ГИС [121], которые использовали индекс Немерова, индекс геоаккумуляции и индекс оценки риска. Авторы пришли к выводу, что интерполяция в основе с индексом геоаккумуляции больше всего подходит для изучения источников загрязнения почв металлами.

Обобщая вышесказанное, можно говорить о недостаточной изученности геохимических особенностей почв на территории КУБа. Исследования этого вопроса в других странах показало, что изучение загрязнения почв металлами крайне важно и необходимо, в том числе для оценки влияния его на здоровье населения. Несомненно, важно в ходе проведения таких исследований применять современные методы обработки и представления данных, таких как ГИС.

### Подходы по эколого-геохимическому районированию территорий

Элементный состав почв формируется под влиянием ряда факторов, из которых большую роль оказывает состав подстилающих горных пород [143]. Но часто высокие концентрации элементов связывают именно с влиянием антропогенной деятельности [133, 138]. Особенно актуальна эта проблема для горнодобывающих районов, где, из-за высокого загрязнения, возможно рассеивание опасно потенциальных элементов на большие расстояния [128].

В рамках прикладных исследований важную роль занимает изучение геохимической специализации отдельных регионов [110]. Значение фоновых содержаний на определенной территории позволяет изучать возможные экологические риски [126, 144, 149], причем в данном случае актуальнее всего после изучения фоновых территорий, выявлять территории, испытывающие высокую антропогенную нагрузку. Изучение геохимических особенностей территории возможно с целью ее рационального зонирования, как это было сделано в прибрежной зоне Южной Кореи [123], территории с высоким содержанием селена и кадмия в Китае [147] или для геоэкологического районирования в целом [109, 134].

Основными причинами, определяющими изменчивость химического состава компонентов природной среды, служат литологический и химический составы почвообразующих пород и зонально-азональная ландшафтно-геохимическая дифференциация, выражающаяся в интенсивности торфонакопления [77].

В основе ландшафтно-геохимического районирования территорий по М.А. Глазвской [30] лежат территориальные различия современных условий миграции элементов, сформированные в результате природных и техногенных процессов. В основу районирования закладываются литогеохимические особенности территории, и в соответствии с ними выделяются [30]:

- Ландшафтно-геохимические пояса;
- Ландшафтно-геохимические области;
- Ландшафтно-геохимические зоны;
- Ландшафтно-геохимические провинции.

В основе эколого-геохимического районирования, чаще всего, лежат принципы системного анализа и положения о геосистемах, разработанные В.Б. Сочавой [95]. В основу ландшафтно-геохимического районирования по М.А. Глазвской [29] положены следующие критерии [29]:

– территориальные различия современных условий водной и биогенной миграции элементов, определяющих миграционную способность поступающих в ландшафты химических веществ;

– комплексы ландшафтно-геохимических процессов, в результате которых накопились те или иные органические и минеральные соединения;

- литогеохимические особенности территории.

В результате, можно сделать вывод, что при проведении районирования территории необходимо учиты-

вать дифференциацию природной среды и техногенную нагрузку, в результате которой происходит влияние на процессе миграции элементов.

### Геохимические исследования в Пермском крае

Во многом изучение геохимических особенностей территории Пермского края проводилось в аспекте поиска месторождений полезных ископаемых [55], в рамках которого проводилось изучение почвенных горизонтов В и С, и сильно реже исследовалось содержание в горизонте А. Геохимическим картированием занимались Г.А. Вострокнутов, Г.П. Гапонцев, В.И. Демидов, В.А. Чувилин, И.С. Копылов, Л.В. Алексеева. Геологосъемочными и поисковыми работами занимались А.М. Кропачев, Б.М. Осовецкий, Р.Г. Ибламинов, А.М. Чумаков, И.А. Эсмонтович, Б.Д. Аблизин, И.Б. Попов, В.Я. Алексеев, Б.В. Клименко, В.М. Бабеньшев, Т.В. Харитонов, В.В. Оборин, А.Г. Попов, С.Б. Суслов и др., различными специализированными исследованиями, особенно нефтепоисковыми А.А. Оборин, Б.А. Бачурин и экологическими С.М. Блинов, Е.А. Ворончихина, Н.Г. Максимович. В результате проведения данных исследований на территории региона были выделены различные геохимические аномалии [57]. По заключению И.С. Копылова [55] общая геолого-геохимическая изученность территории довольно высока, но крайне неравномерна. Отдельный интерес представляют палеоэкологические исследования [66, 90], которые также проводятся на территории региона, особенно в рамках изучения особенностей болотных экосистем. Помимо исследования содержания элементов в почвах, проводится масштабное изучение накопление элементов в мхах [119].

М.А. Глазвская территорию Пермского края относит к Верхнекамской ландшафтно-геохимической области [29]. А.М. Кропачев и Е.А. Белозерова [59] позднее определили геохимические районы на территории региона, выделив следующие [59]:

- элювиально-трансэлювиальный район Урала;
- элювиально-субэлювиальный район с подрайонами:
  - Верхнекамской водно-ледниковой равнины;
  - Предуральского прогиба;
- субэлювиально-трансэлювиальный район на поднятом пенеппене Уфимского плато.

Изучая литогеохимические особенности территории Пермского Приуралья и Урала, И.С. Копыловым были предложены средние содержания некоторых элементов [56], и создано ландшафтно-геохимическое районирование Пермского края [58]. В рамках проведенного исследования были выделены следующие элементарные ландшафты [58]: трансэлювиальные (верхние части склонов), элювиально-аккумулятивные (нижние части склонов) и аккумулятивно-элювиальные (местные депрессии). В таблице 2 / table 2 показаны средние содержания элементов, предложенные И.С. Копыловым [56].

Таблица 2

## Средние содержания элементов (мг/кг) по И.С. Копылову [56]

Table 2

## Mean contents of the elements (mg/kg) by I.S. Kopylov [56]

Sr	Pb	Zn	Cu	Ni	Co	Mn	Cr	V	Ti
86	29	82	66	37	17	1280	290	99	3520
Mo	Sn	Cd	Ga	Hg	Zr	Be	Ba	P	
1,3	13	3	12	0,005	380	7	333	660	

Ранее, изучая геохимические особенности территории региона, А.М. Кропачевым и Е.А. Белозеровой [59] были выделены следующие районы: элювиально-трансэлювиальный район Урала, элювиально-субэлювиальный район (с подрайонами Верхнекамской водно-ледниковой равнины и Предуральского прогиба) и субэлювиально-трансэлювиальный район на приподнятом пенепплене Уфимского плато.

В последних работах [34, 36, 37] было получено природно-техногенное геохимическое районирование

Пермского края, где исследовался верхний почвенный горизонт, с самыми активными геохимическими процессами. В результате были получены средние содержания элементов в почвах всего Пермского края, в 6 природных районах Пермского края и выделено для природно-техногенных районов. По результатам исследований зарегистрирована база данных [13]. В таблице 3 / table 3 представлены данные о региональном фоновом содержании в почвах Пермского края.

Таблица 3

## Региональное фоновое содержания макро- и микроэлементов на территории Пермского края в гумусовом горизонте [37]

Table 3

## Regional background content of macro- and microelements in the humus horizon of the Perm region [37]

Элементы // Elements	Показатели, мг/кг // Parameters mg/kg	Пермский край // Perm Region	I – Северный Урал // Northern Ural	II – Западный Урал // Western Ural	III – Средняя тайга // Middle Taiga	IV – Южная тайга // Southern Taiga	V – Хвойно-широколиственных леса // Coniferous-broadleaf forests	VI – Кунгурская лесостепь // Kungur forest steppe
	<i>n</i>	300	35	40	44	50	45	86
Sr	$\bar{x} \pm P$	238±10	85±14	186±25	229±23	290±22	229±23	239±12,3
Pb	$\bar{x} \pm P$	15±1	18±3	17±2	16±2	15±1	12±1	15±1
As	$\bar{x} \pm P$	7,5±1	6,9±1	7±1	5,8±1	7,8±1	8,4 ±1	7,7±1
Zn	$\bar{x} \pm P$	59±2	55±8	67±9	47±5	65±5	62±5	56±3
Ni	$\bar{x} \pm P$	41±2	31±3	40±5	16±2	35±3	52±5	46±2
Co	$\bar{x} \pm P$	14±1	11±1	8 ±1	6±1	9±1	8±1	24±1
Fe	$\bar{x} \pm P$	24 500 ±700	29 200 ±3400	29 800 ±3600	22 300 ±1800	23 600 ±1400	25 200 ±2300	23 400 ±1000
Mn	$\bar{x} \pm P$	762±27	376±35	517±61	828±52	768±61	866±68	796±41
Cr	$\bar{x} \pm P$	127±3	141±7	135±6	105±8	124±6	148±10	126±4
V	$\bar{x} \pm P$	65±3	87±14	100±13	60±6	60±4	57±5	63±4
Ti	$\bar{x} \pm P$	4 200 ±100	5 200 ±600	4 900 ±500	4 100 ±300	4 000 ±200	4 000 ±300	4 200 ±200

В результате исследования территории Пермского края были выделены следующие районы [37]:

1. Северный Урал лито-сидеро-халькофильной специализации с ванадий-цинково-полиметаллической ассоциацией.

2. Западный Урал лито-сидеро-халькофильной специализации с ванадий-полиметаллической ассоциацией.

3. Кизеловский угольный бассейн сидеро-халько-литофильной специализации с кобальт-марганцево-полиметаллической ассоциацией.

4. Средняя тайга сидеро-халькофильной специализации с марганцево-свинцовой ассоциацией.

5. Южная тайга лито-халькофильной специализации со стронций-цинковой ассоциацией.

6. Верхнекамское месторождение калийных солей сидеро-лито-халькофильной специализации с кобальт-полиметаллической ассоциацией.

7. Хвойно-широколиственных лесов сидеро-лито-халькофильной специализации с никелево-полиметаллической ассоциацией.

8. Кунгурская лесостепь сидерофильной специализации с кобальт-никелевой ассоциацией.

Особое внимание в рамках геохимических особенностей территорий посвящено изучению заповедных территорий региона, что является важным как для сохранения уникальных природных сообществ [88], так и является обоснованным для установление фоновых содержаний элементов. Приведенное выше районирование [34, 36, 37], так же было получено посредством изучения геохимических свойств почв особо охраняемых природных территорий (для установления регионального геохимического фона), была зарегистрирована база данных о геохимических свойствах почв заказника «Предуралье» [12]. Была проведена оценка влияния на загрязнение почв металлами территории заповедников «Басеги» и «Вишерский» в результате трансграничного переноса [6, 101]. В результате исследования сделан вывод, что, несмотря на значительную удаленность от объектов хозяйственной деятельности на территориях заповедников фиксируется влияние антропогенной деятельности, выраженное в накопление техногенных элементов. Вследствие чего, можно говорить о том, что в целом в процессе антропогенной деятельности изменяется и общее фоновое содержание на территориях.

Полученные результаты по изучению заповедных территорий легки в основу изучения влияния антропогенной деятельности на территории крупных промышленных городов: Пермь, Березники, Красновишерск, Соликамск [26]. В результате, для данных городов как приоритетные загрязнители были выявлены Co, Zn, Pb, As, Ni, Cr, V, Mn. О.З. Еремченко и др. [45] получили данные по средним содержаниям металлов в крупных городах Пермского края, разделяя городские территории на природно-рекреационные, промышленные, жилые зоны и зоны жилой застройки. В результате чего, они пришли к выводу, что ведущими факторами, ведущими к накоплению элементов, являются химизм пород и техногенная нагрузка.

А.А. Васильев и А.Н. Чашин [16] оценивали содержание тяжелых металлов в городе Чусовом, который в большой степени испытывает антропогенное воздействие в результате металлургического производства. В результате они выявили, что геохимические особенности почв исследуемой территории определяются как естественными, так и техногенными факторами. Причем, они выявили, что техногенный фактор преобладает в техноземах, а антропогенный – в агроземах. Металлургическое производство, по их данным, является причиной накопления в почвах  $Fe_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $SO_3$ , CaO в поверхностных горизонтах почв.

Е.А. Ворончихина и В.И. Ждакаев [27] изучали содержание As в естественных и техногенных ландшафтах Пермского края. В результате они выявили, что в почвенном покрове региона As накапливается на территориях техногенного влияния (в частности на территориях добычи нефти и калийных солей). Такое накопление As объясняется изначально ее свойствами к активной миграции благодаря высокой водорастворимости, атмосферной легучести, химическое взаимодействие со многими металлами и серой, высокой сорбционной и биохимической активности.

Изучая техногенные ландшафты в Пермском крае, многие ученые исследуют нефтезагрязненные территории [7, 10, 15, 34, 35, 37, 61, 62, 68, 72, 73, 86, 105].

В работах [35, 37] приведены данные о среднем содержании ряда химических элементов в почвах территорий, находящихся в зоне влияния нефтедобычи. Показано, что для таких территорий характерно накопление Mn, Ni, Sr, Pb и Zn.

На территории Верхнекамского месторождения солей проводилось отдельное изучение накопления микроэлементов в техногенных поверхностных образованиях и растениях [44]. В техногенных поверхностных образованиях, в результате данного исследования, было выявлено высокое накопление Cu, Mn, Pb и Co. В растениях было отмечено повышенное содержание Ba, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn и Li. Так же геохимические особенности территории Верхнекамского месторождения калийных солей исследовались и другими учеными [11, 34, 37, 43, 100, 102, 103]. В работах [11, 37] приведены данные о среднем содержании ряда химических элементов в почвах территорий, находящихся в зоне влияния добычи калийных солей. Показано, что характерным является накопление Co, Zn, Mn, Sr, V, Cr и Fe.

Отдельно изучают геохимические особенности Кизеловского угольного бассейна [9, 34, 37, 63, 64, 115]. В работах [37, 115] приведены данные о среднем содержании ряда химических элементов в почвах Кизеловского угольного бассейна. Показано, что для таких территорий характерно накопление Co, Ni, Mn, Cr, As, Zn, V, Ti и Pb.

### Выводы

1. Основной проблемой исследования в геохимии была и остается проблема миграции химических элементов, изучение закономерностей аккумуляции и рассеивания веществ. В ходе изучения факторов, которые оказывают влияние на геохимические процессы, высокую роль играет учет кларков элементов.

2. Выделяются элементы, содержание которых обусловлено нефтяным загрязнением. В данном случае достаточно универсальным для всех природных зон считается Sr, так же говорят о загрязнении почв V, Ni, Cr, As, Ti. При оценке распространения загрязнения вокруг месторождения актуальным является содержание Zn и Pb. Ni и Cd относят к металлам, которые присутствуют в составе нефти, а значит, являются важными для мониторинга нефтезагрязненных территорий.

3. При добыче калийных солей происходит антропогенная трансформация природной среды, которая ведет к значительному ухудшению состояния окружающей среды, в том числе выражающемуся в загрязнение территории химическими элементами.

4. Можно говорить о недостаточной изученности геохимических особенностей почв на территории КУБа. На данном момент проведено исследование верхнего горизонта, но остается актуальным изучение потоков миграции в радиальном и латеральном направлениях. Исследования этого вопроса в других странах показало, что изучение загрязнения почв металлами крайне важно и необходимо, в том числе для оценки влияния его на здоровье населения.

5. В процессе разработки геохимического районирования территории необходимо учитывать дифференциацию природной среды и техногенную нагрузку, в результате которой происходит влияние на процессе миграции элементов.

## Список источников

1. *Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С.* Микроэлементозы человека. М.: Медицина, 1991.
2. *Алексеев В.А., Бузмаков С.А., Панин М.С.* Геохимия окружающей среды: учеб. Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь. 2013. 359 с.
3. *Андреев Д.Н., Бузмаков С.А.* Антропогенная трансформация лесных экосистем по геохимическим и фотосинтетическим параметрам // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 2. С. 49-57.
4. *Арестова И.Ю., Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю.* Эколого-геохимическая оценка состояния природной среды в районах нефтедобычи // Геохимия биосферы. М.; Смоленск. 2006. С. 41-42.
5. *Батулин Е.Н., Меньшикова Е.А., Блинов С.М., Наумов Д.Ю., Белкин П.А.* Проблемы освоения крупнейших калийных месторождений мира // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7513> (дата обращения: 09.10.2024).
6. *Бахарев П.Н., Ворончихина Е.А., Ильиных С.И., Лоскутова Н.М.* Технофильные элементы в особо охраняемых экосистемах Западноуральской тайги // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1-8. С. 2136-2139.
7. *Бачурин Б.А.* Эколого-геохимическая оценка продуктов деградации нефти в условиях гипергенеза // Антропогенная трансформация природной среды. 2019. № 5. С. 8-14.
8. *Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.
9. *Блинов С.М., Максимович Н.Г., Меньшикова Е.А.* Современное техногенное минералообразование в аллювии рек Кизеловского угольного бассейна // Минералогия техногенеза. 2003. Т. 4. С. 20-38.
10. *Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Дзюба Е.А.* Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620097 РФ. Геоинформационная база данных «Миграция углеводородов в водоохранной зоне Камского водохранилища». № 2020622892. 2021.
11. *Бузмаков С.А., Дзюба Е.А.* Оценка загрязнения почв потенциально токсичными элементами в зоне влияния добычи калийных солей // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 5. С. 46-50. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-46-50>
12. *Бузмаков С.А., Дзюба Е.А., Сивков Д.Е.* Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620098 РФ. Геоинформационная база данных геохимических свойств почв ландшафтного заказника Предуралья. № 2020622893. 2021.
13. *Бузмаков С.А., Дзюба Е.А., Сивков Д.Е.* Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620099 РФ. Геоинформационная База данных геохимических свойств почв на территории Пермского края: № 2020622894. 2021.
14. *Бузмаков С.А., Санников П.Ю., Сивков Д.Е., Дзюба Е.А., Хотяновская Ю.В., Егорова Д.О.* Разработка геоинформационных систем для управления окружающей средой и экологической безопасностью в районах эксплуатируемых нефтяных месторождений // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 1. С. 102-127. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127>
15. *Бузмаков С.А., Хотяновская Ю.В., Андреев Д.Н.* Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621102 РФ. Техногенная трансформация природной среды в карстовом районе. № 2021620770. 2021.
16. *Васильев А.А., Чащин А.Н.* Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения. Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. 2011. 188 с.
17. *Вернадский В.И.* Об анализе почв с геохимической точки зрения // Почвоведение. 1936. № 1. С. 8-16.
18. *Вернадский В.И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения (Серия «Библиотека трудов академика В.И. Вернадского»). М.: Наука. 2001. 376 с.
19. *Виноградов А.П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. Вып. 7. С. 555-571.
20. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР. 1953. 237 с.
21. *Виноградов А.П.* О генезисе биогеохимических провинций // Труды Биогеохимической лаборатории АН СССР. 1960. Т. 11.
22. *Виноградов А.П.* Основные закономерности распределения микроэлементов между растениями и средой // Микроэлементы в жизни растений и животных. Изд-во АН СССР. 1952.
23. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7.
24. *Водяницкий Ю.Н.* Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор). Почвоведение. 2013. № 7. С. 793-801. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13050171>
25. *Водяницкий Ю.Н.* Современные тенденции загрязнения почв тяжелыми металлами // Агрохимия. 2013. № 9. С. 88-96.
26. *Ворончихина Е.А., Блинов С.М., Меньшикова Е.А.* Технофильные металлы в естественных и урбанизированных экосистемах Пермского края // Экология урбанизированных территорий. 2013. № 1. С. 103-108.
27. *Ворончихина Е.А., Ждакаев В.И.* Мышьак в естественных и техногенных геосистемах Пермского края // Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Под ред. В.И. Осипова, Н.Г. Максимовича, А.А. Баряха, Е.В. Булдаковой, А.Д. Деменева, О.Н. Ереминой, В.Г. Заиканова, В.Н. Катаева, Ю.А. Мамаева, О.Ю. Мещеряковой. 2019. С. 278-283.
28. *Гамм Т.А., Гамм А.А.* Исследование закономерностей распространения от источника загрязнения тяжелых металлов и нефтепродуктов на месторождении нефти // Наука и мир. 2015. № 2-1(18). С. 109-112.
29. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. М.: Высшая шк., 1988. 326 с.
30. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов: учеб. Пособие. М.: Географический факультет МГУ. 2007. 305 с.

31. Глазовская М.А. Содержание металлов в почвах различного типа. Геохимические поиски рудных месторождений в СССР. М.: Росгеолтехиздат, 1957.
32. Голик В.И., Заалишвили В.Б., Разоренов Ю.И. Проблемы региональной экологии Восточного Донбасса // Проблемы региональной экологии. 2014. № 3. С. 55-59.
33. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: УРО РАН. 2009. 382 с.
34. Дзюба Е.А. Геохимическая идентификация антропогенной трансформации природной среды на территории Пермского края: дис. канд. геогр. наук: 1.6.21. Пермь, 2022. 235 с.
35. Дзюба Е.А. Загрязнение почв потенциально токсичными элементами при эксплуатации нефтяных месторождений // Современные направления развития геохимии: материалы Всероссийской конференции (с участием зарубежных ученых), посвященной 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона, Иркутск, 21-25 ноября 2022 года. Иркутск: Институт географии им. В.Б. Сочавы Сибирского отделения Российской академии наук. 2022. С. 160-162.
36. Дзюба Е.А. Определение местного фоновое содержания некоторых макро- и микроэлементов в почвах Пермского края // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 1(56). С. 95-108. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-95-108>
37. Дзюба Е.А. Природно-техногенное геохимическое районирование Пермского края // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 3(70). С. 139-151. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-3-139-151>
38. Добровольский В.В. Биогеохимические циклы тяжелых металлов // Геохимия. 1988. № 2.
39. Добровольский В.В. География микроэлементов. Глобальное рассеяние. М.: Мысль. 1983.
40. Добровольский В.В. Распределение рассеянных химических элементов между почвообразующей породой, почвой и растительностью в условиях Подмосковья // Науч. доклады высшей школы. Биол. науки. 1963. № 3.
41. Добровольский В.В. Химия Земли. М.: Просвещение, 1980.
42. Дорожкува С.Л., Янин Е.П. Буровые амбары как источники загрязнения природных вод в нефтедобывающих районах // Геохимия биосферы. 2006. С. 123-125.
43. Еремченко О.З., Митракова Н.В., Шестаков И.Е. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в Соликамско-Березниковском экономическом районе // Вестник Пермского университета. Серия Биология. 2017. Вып. 3. С. 311-320.
44. Еремченко О.З., Москвина Н.В., Шестаков И.Е., Швецов А.А. Использование тест-культур для оценки экологического состояния городских почв // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 5. С. 1280-1284.
45. Еремченко О.З., Шестаков И.Е., Москвина Н.В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: ПГНИУ, 2016. 252 с.
46. Закруткин В.Е., Зубова Л.Г., Гибков Е.В., Зубов А.Р., Воробьев С.Г. Терриконы углепромышленных районов Донбасса как источник воздействия на окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2017. № 3-1(195-1). С. 69-75.
47. Зырин Н.Г. Распределение и варьирование содержания микроэлементов в почвах русской равнины // Почвоведение. 1968. № 7.
48. Зырин Н.Г., Белицина Г.Д., Брысова Н.П. Содержание микроэлементов семейства железа в некоторых почвах СССР // Вестник МГУ. Сер. 6. 1961. № 5.
49. Иларионов С.А. Экологические аспекты восстановления нефтезагрязненных почв. Екатеринбург: УРО РАН, 2004. 192 с.
50. Казакова Н.А. Загрязнение почвы тяжелыми металлами // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2009. № 1. С. 29-31.
51. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 2. С. 7-17.
52. Ковальский В.В. Геохимическая экология. М.: Наука, 1974.
53. Ковальский В.В., Андрианова Г.А. Микроэлементы в почвах СССР. М.: Наука. 1973.
54. Ковда В.А., Якушевская И.В., Тюрюканов А.Н. Микроэлементы в почвах Советского Союза. М.: Изд-во МГУ, 1959.
55. Копылов И.С. Концепция и методология геоэкологических исследований и картографирования платформенных регионов // Перспективы науки. 2011. № 8(23). С. 126-129.
56. Копылов И.С. Литогеохимические аномальные зоны Западного Урала и Приуралья // Вестник Пермского университета. Геология. 2012. 2(15). С. 16-34.
57. Копылов И.С. Особенности геохимических полей и литогеохимические аномальные зоны Западного Урала и Приуралья // Вестник Пермского университета. Геология. 2011. 1(10). С. 26-37.
58. Копылов И.С., Даль Л.И. Типизация и районирование ландшафтно-геохимических систем // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. С. 772.
59. Кропачев А.М., Белозерова Е.А. Ландшафтно-геохимическое районирование территории Пермской области // Проблемы геологии Пермского Урала и Приуралья. 1998. С. 26-27.
60. Лискова М.Ю. Негативное воздействие, оказываемое на окружающую среду предприятиями по добыче и обогащению калийно-магниевых солей. Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т.16, № 1. С.82-88. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.1.9>
61. Максимович Н.Г., Казакевич С.В., Никифоров В.В. Роль карста в формировании нефтяного загрязнения гидросферы в районе п. Полазна // Геология и полезные ископаемые Западного Урала: материалы рег. научно-практ. конференции. 2005. С. 290-295.

62. Максимович Н.Г., Мецеракова О.Ю. Методы борьбы с нефтяным загрязнением на закарстованных берегах водохранилищ // Экология урбанизированных территорий. 2009. № 4. С. 55-58.
63. Максимович Н.Г., Мецеракова О.Ю., Пьянков С.В., Хайрулина Е.А. Эколого-геохимические проблемы угольных месторождений и пути их решения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования. Материалы Международной научной конференции, посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко. Под редакцией А.К. Карабанова. 2017. С. 291-294.
64. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. Пермь: гос. нац. исслед. ун-т., 2018. 288с.
65. Максимович Н.Г., Хайрулина Е.А. Геохимические барьеры и охрана окружающей среды. Пермь: Изд-во ПГУ, 2011. 248 с.
66. Мехоношина Е.А., Копытов С.В., Санников П.Ю., Шумиловских Л.С. База данных палеоархивов позднего плейстоцена и голоцена Пермского Прикамья – PaleoPerm // Антропогенная трансформация природной среды. 2022. Т. 8. № 1. С. 58-77. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-58-77>
67. Мецеракова О.Ю. Зонирование закарстованных территорий по степени устойчивости к нефтяному загрязнению // Геология и полезные ископаемые западного Урала. 2015. № 15. С. 136-139.
68. Мецеракова О.Ю., Максимович Н.Г. Особенности нефтяного загрязнения карстовых районов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 11. С.188-190.
69. Мотузова Г.В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ». 2013. 168 с.
70. Никифорова Е.М., Солнцева Н.П. Геохимия техногенных потоков и ореолов загрязнения в районах угледобычи (на примере Кизеловского бассейна). Геохимия ландшафтов и географии почв. М.: Изд-во МГУ. 1982.
71. Никифорова Е.М., Солнцева Н.П., Сорокина Н.А. Геохимия тяжелых металлов в природных и техногенных ландшафтах. М.: Изд-во МГУ. 1983.
72. Оборин А.А., Хмурчик В.Т., Иларионов С.А. Макарова М.Ю., Назаров А.В. Нефтезагрязненные биоценозы. Пермь: Изд-во ПГУ. 2008. 511 с.
73. Оборин А.А., Шишкин М.А., Одинцова Т.А. О природе нефтяного загрязнения Камского водохранилища в районе Полазненского нефтепромысла // Факторы и механизмы регуляции развития бактериальных популяций. Сборник научных трудов. 1990. С. 70–73.
74. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Оценка экологического состояния природной среды районов добычи нефти и газа в ЯНАО // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2012. № 4. С. 87-101.
75. Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Сомов В.В., Митрофанова Е.С., Кукушкин С.Ю. Влияние разработки Сибайского месторождения (Южный Урал) на трансформацию потока металлов в подчиненных ландшафтах // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2018. № 1. С. 14-24.
76. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы нефтегазоконденсатных месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 2007. № 1. С. 124-127.
77. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422-439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114>
78. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Лисенков С. Результаты комплексных эколого-биогеохимических исследований ландшафтов в районах нефтегазодобычи Арктики // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики: Тезисы докладов международной научной конференции, Санкт-Петербург, 02-04 марта 2020 года. Санкт-Петербург: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. 2020. С. 122-125.
79. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Лисенков С.А., Власов С.В., Сомов В.В. Загрязнение почв севера Западной Сибири нефтяными и полициклическими ароматическими углеводородами: распределение и оценка экологического риска // Почвоведение. 2022. № 11. С. 1442-1460. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110107>
80. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Арестова И.Ю., Кукушкин С.Ю., Спасский В.В., Никитина М.А., Елсукова Е.Ю., Шейнерман Н.А., Недбаев И.С. Использование методов биоиндикации и биотестирования в оценке экологического состояния территории газоконденсатных месторождений севера Западной Сибири // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63. № 3. С. 326-344. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.305>
81. Органическая геохимия / Под ред. Дж. Эглинтон, М.Т.Дж. Мерфи. Л.: Недра. 1974. 487 с.
82. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа. 1989. 407 с.
83. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Краснопева А.А. Пузанова Т.А. Углеводородные геохимические поля в почвах района нефтяного промысла // Вестник Московского ун-та. Серия 5 География. 2009. № 5. С. 28-34.
84. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Оборин А.А. Углеводородное состояние почв на территории нефтедобычи с карстовым рельефом // Почвоведение. 2008. № 11. С. 1314-1323.
85. Пиковский Ю.И., Смирнова М.А., Ковач Р.Г., Пузанова Т.А., Хлынина А.В., Хлынина Н.И. Поведение углеводородов в карстовых ландшафтах // Естественные и технические науки. 2014. № 9-10. С. 133-143.
86. Порозова А.С., Санников П.Ю. Оценка влияния сжигания попутного газа на радиальный прирост *Pinus sylvestris* (Озёрное месторождение нефти, Пермский край, Россия) // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 2. С. 58-74.

87. Саен Ю.Е., Раевич Б.А., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П., Саркисян С.Ш. Город как техногенный субрегион биосферы // Биогеохимическое районирование и геохимическая экология. М.: Наука. 1985. С. 133-166.
88. Санников П.Ю. Сохранение степных сообществ Прикамья: приоритетные объекты // Вопросы степеведения. 2019. № 15. С. 295-299. <https://doi.org/10.24411/9999-006A-2019-11545>
89. Санников П.Ю., Андреев Д.Н., Бузмаков С.А. Выявление и анализ сухостоя при помощи беспилотного летательного аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 3. С. 103-113.
90. Санников П.Ю., Копытов С.В., Игошева Е.А., Мехоношина Е.А., Новикова Е.А., Пехтерева М.К., Соловьева Е.Е., Самаркина А.А. Оценка морфометрических параметров озер болотных котловин севера пермского Прикамья // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 2(69). С. 109-123. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-2-109-123>
91. Соколов Э.М., Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю. Формирование нефтяного загрязнения сульфатного массива в карстовых районах и методы его ликвидации // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 79-89.
92. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ. 1998. 369 с.
93. Солнцева Н.П., Никифорова Е.М. Влияние угледобычи на геохимию ландшафтов (на примере Подмосковского и Кизеловского бассейнов). Охрана геологической среды от отрицательного влияния предприятий горнодобывающего профиля. М.: Изд-во МГУ, 1984. С. 189-192.
94. Солнцева Н.П., Никифорова Е.М. Кадмий, свинец и цинк в почвах Кизеловского угольного бассейна. Геохимия тяжелых металлов в природных и техногенных ландшафтах. М.: Изд-во МГУ. 1983. С. 150-167.
95. Сочава Б.В. Введение в учение о геосистемах. Новосибирск: Наука, 1978. 319 с.
96. Троицкий Е.Я. Основные проблемы учения о микроэлементах в системе почва-растение // Вестник МГУ. Сер. Биология. № 5. 1960.
97. Турковская О.В., Муратова А.Ю., Дубровская Е.В., Бондаренкова А.Д., Любунь Е.В. Фиторемедиационный потенциал сорго веничного для очистки земель от углеводородов нефти и тяжелых металлов // Аграрный научный журнал. 2020. № 12. С. 50-54. <https://doi.org/10.28983/asj.y2020i12pp50-54>
98. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 1. С. 6-34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
99. Ферсман А.Е. Геохимия. Т.1.Л.: Госхимтехиздат. 1933. 328с.
100. Хайрулина Е.А., Митракова Н.В., Новоселова Л.В., Порошина Н.В. Трансформация почвенно-растительного покрова в результате влияния изливающихся древних рассолоподъемных скважин на территории Пермского края // Географический вестник = Geographical Bulletin. 2021. № 4(59). С. 113-129.
101. Хайрулина Е.А., Никифорова Е.М., Ворончихина Е.А. Влияние регионального переноса загрязнителей на трансформацию биогеохимических параметров горнотаёжных ландшафтов // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 1. С. 61-68.
102. Хайрулина Е.А., Новоселова Л.В., Порошина Н.В. Природные и антропогенные источники водорастворимых солей на территории Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Географический вестник. 2017. № 1(40). С. 93-101. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-93-101>
103. Хайрулина Е.А., Новоселова Л.В., Шестаков И.Е., Богуш А.А. Формирование природно-техногенных ландшафтов при разработке месторождения калийных солей // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. 2018. С. 220-223.
104. Хорошевская В.О. Закономерности миграции биометаллов на геохимических барьерах «суша - вода» в районах залегания угольных пластов и их промышленной разработки (на примере Донецкого угольного бассейна) // Естественные и технические науки. 2012. № 1(57). С. 206-213.
105. Хотяновская Ю.В., Бузмаков С.А., Кучин Л.С. Геоэкологические закономерности трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения в карстовом районе // Географический вестник. 2023. № 1(64). С. 127-138. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-1-127-138>
106. Черников А.А. Особенности формирования геохимических барьеров в приповерхностной и глубинной зонах гипергенеза // Геохимические барьеры в зоне гипергенеза. М.: Изд-во МГУ, 2002. С. 154-161.
107. Школьник М.Я. Значение микроэлементов в жизни растений и в земледелии. М.: Изд-во АН СССР, 1950.
108. Янин Е.П. Основные обобщения геохимии как теоретической базы и методологические принципы изучения техногенного загрязнения биосферы (к 155-летию со дня рождения В.И. Вернадского) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2018. № 4. С. 2-24.
109. Ahmadi M., Jorfi S., Azarmansuri A., Jaafarzadeh N., Mahvi A.H., Darvishi Cheshmeh Soltani R., Akbari H.R., Akhbarizadeh R. Zoning of heavy metal concentrations including Cd, Pb and As in agricultural soils of Aghili plain, Khuzestan province, Iran // Data in Brief. 2017. Vol. 14. P. 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.07.008>
110. Ayari J., Barbieri M., Barhouni A., Belkhiria W., Braham A., Dhaha F., Charef A. A regional-scale geochemical survey of stream sediment samples in Nappe zone, northern Tunisia: Implications for mineral exploration // Journal of Geochemical Exploration. 2022. Vol. 235(4). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106956>
111. Baure M., Eichinger L., Elsass P., Kloppmann W., Wirsing G. Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the Southern Rhine Graden // Int. J. Earth Sci. 2005. 94. P. 565-579. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0500-5>
112. Bian Z., Lu Q. Ecological effects analysis of land use change in coal mining area based on ecosystem service valuing: A case study in Jiawang // Environmental Earth Sciences. 2013. № 68(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1855-0>
113. Cardoso A., Mainardi F.F. A first evaluation of water resource conditions after an environmental reclamation effort at a former degraded coal mining area in

- Southern Brazil // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. № 193(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09393-4>
114. *Daliakopoulou I.N., Tsanisab I.K., Koutroulisa A., Kourgialasa N.N., Varouchakisa A.E., Karatzasa G.P., Ritsemac C.J.* The threat of soil salinity: A European scale review // Science of The Total Environment. Vol. 573. P. 727-739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
115. *Dziuba E., Buzmakov S., Khotyanovskaya Yu.* Study of geochemical features of soils on the territory of an abandoned coal mining area using geoinformation technologies // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45, № 12. P. 9135-9155. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01534-7>
116. *Fazekasová D., Fazekas J., Stofejova L.* Metal pollution assessment of surface water in the emission field of the slovinky tailing impoundment (Slovakia) // Water. 2021. № 13(3143). <https://doi.org/10.3390/w13213143>
117. *Fiedler S., Siebe C., Herre A., Roth B., Cram S., Stahr K.* Contribution of oil industry activities to environmental loads of heavy metals in the Tabasco lowlands, Mexico // Water Air Soil Pollut. 2009. Vol. 197. P. 35-47.
118. *Gao S., Luo T.-C., Zhang B.-R.* Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China // Geochim. Cosmochim. Acta. 1998. Vol. 62, Iss. 11. P. 1959-1975.
119. *Gatina E., Zinicovscaia I., Yushin N., Chaligava O., Frontasyeva M., Sharipova A.* Assessment of the Atmospheric Deposition of Potentially Toxic Elements Using Moss *Pleurozium schreberi* in an Urban Area: The Perm (Perm Region, Russia) Case Study // Plants. 2024. Vol. 13(17). 2353. <https://doi.org/10.3390/plants13172353>
120. *Goldschmidt V.M.* Grundlagen der quantitativen Geochemie // Fortschr. Mineral. Kinst. Petrogr. 1933.
121. *Hu H., Han L., Li L., Wang H., Xu T.* Soil heavy metal pollution source analysis based on the land use type in Fengdong District of Xi'an, China // Environmental Monitoring and Assessment. 2021. 193(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09377-4>
122. *Hu Z., Gao S.* Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update // Chem. Geol. 2008. Vol. 253, Iss. 3-4. P. 205-221.
123. *Jung H.S., Lim D., Xu Z., Kim J., Lee J., Jeong D.* Zoning of coastal environments based on sediment textural and geochemical characteristics and their major oceanographic constraints: A case study in South Korea // Journal of Asian Earth Sciences. 2021. 218, 104883. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104883>
124. *Khayrulina E., Bogush A., Novoselova L., Mitrakova N.* Properties of Alluvial Soils of Taiga Forest under Anthropogenic Salinisation // Forests. 2021. Vol. 12. P. 321. <https://doi.org/10.3390/f12030321>
125. *Khayrulina E.A., Khmurchik V.T., Maksimovich N.G.* The Kizel Coal Basin (The Western Urals, Russia): Environmental problems and Solutions // Mining Meets Water – Conflicts and Solutions. Proceedings IMWA 2016 Annual Conference. P. 761-767.
126. *Long J., Tan D., Deng S., Lei M.* Pollution and ecological risk assessment of antimony and other heavy metals in soils from the world's largest antimony mine area, China // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2018. 25(3), pp. 602-613. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1396531>
127. *Magno M., Luffman I., Nandi A.* Evaluating spatial regression-informed cokriging of metals in soils near abandoned mines in bumpus cove, Tennessee, USA // Geosciences. 2021. Vol. 11(11), 434. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110434>
128. *Martínez-López S., Martínez-Sánchez M.J., Gomez-Martínez M.D., Perez-Sirvent C.* Arsenic zoning in a coastal area of the Mediterranean Sea as a base for management and recovery of areas contaminated by old mining activities // Applied Clay Science. 2020. Vol. 199, 105881. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105881>
129. *Nassiri O., Láarabi E.L. Hachimi M., Ambrosi J.P., Rhoujjati A.* Contamination impact and human health risk in surface soils surrounding the abandoned mine of Zeïda, High Moulouya, Northeastern Morocco // Environment Development and Sustainability. 2021. 23(1). <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01380-6>
130. *Nitzsche N., Siebel W., Stober I.* Geologische, hydrogeologische und anthropogene Einflüsse auf die Wasserchemie der Möhlin, Schwarzwald – eine Momentaufnahme // Grundwasser Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie. 2021. 26. P.175-189. <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00480-4>
131. *Ogbo E.M., Okhuoya J.A.* Bioavailability of some heavy metals in crude oil contaminated soils remediated with *Pleurotus tuber-regium* Fr. Singer // Asian J. Biol. Sci. 2011. Vol. 4. P. 53-61.
132. *Opekinov A., Opekinova M., Kukushkin S., Lisenkov S.* Impact of drilling waste pollution on land cover in a high subarctic forest-tundra zone // Pedosphere. 2022. Vol. 32, P. 414-425. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60083-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60083-8)
133. *Pashkevich M.A., Bech J., Matveeva V.A., Alekseenko A.V.* Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg // Journal of Mining Institute. 2020. Vol. 241(1). P. 125-130. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125>
134. *Podlipskiy I.I., Dubrova S.V., Zelenkovskiy P., Lebedev S.V., Izosimova O.S., Chernova E.N., Nesterov E., Egorov P.* Geoecological zoning of modern geological objects composed of technogenic soils. Distribution of Zn, Cu, Pb, Fe, Hg and As in technogenic dispersed soils and bottom sediments // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2020. 579(1):012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012016>
135. *Polemio M., Dragone V., Limoni P.* Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers (Apulia, Southern Italy) // Environmental Geology. 2009. Vol. 58. P. 299-312.
136. *Pyankov S.V., Maximovich N.G., Khayrulina E.A., Berezina O.A., Shikhov A.N., Abdullin R.K.* Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images // Mine Water and the Environment. 2021. Vol. 40(3). <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
137. *Redondo-Vega J.M., Melon-Nava A., Pena-Perez S.A., Santos-Gonzalez J., Gomez-Villar A., Gonzalez-Gutierrez R.B.* Coal pit lakes in abandoned mining areas in León (NW Spain): characteristics and geoecological significance // Environmental Earth Sciences. 2021. Vol. 80(24). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10037-6>

138. Rezaei H., Mehrabi B., Khanmirzaee A., Shahbazi K. Arsenic heavy metal mapping in agricultural soils of Alborz province, Iran // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 101. P. 127-139. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1661398>

139. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. 2003. Vol. 3. P. 1-64.

140. Ruppen D., Chituri O.A., Meck M.L., Pfenninger N., Wehrli B. Community-Based Monitoring Detects Sources and Risks of Mining-Related Water Pollution in Zimbabwe // *Frontiers in Environmental Science*. 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.754540>

141. Rustamov G., Ismaylova L. Geochemistry landscape classification: toxicity of chemical elements and their impact on human health // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44(1). P. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00747-4>

142. Shaw D.M., Dostal J., Keays R.R. Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1976. Vol. 40. Iss. 1. P. 73-83.

143. Silva R.J., Silva Y.J., Straaten P., Nascimento C.W., Biondi C.M., Silva Y.J., Araújo Filho, J.C. Influence of parent material on soil chemical characteristics in a semi-arid tropical region of Northeast Brazil // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194(5). [https://doi.org/10.11137/2018\\_2\\_397\\_409](https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409)

144. Solgi E., Jalili M.J. Zoning and human health risk assessment of arsenic and nitrate contamination in groundwater of agricultural areas of the twenty two village with geostatistics (Case study: Chahardoli Plain of Qorveh, Kurdistan Province, Iran) // *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 255. 107023. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107023>

145. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: Its composition and evolution // Oxford: Blackwell Sci. Publ. 1985. 330 p.

146. Waltham T., Bell F., Culshaw M. Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction. Chichtster: Praxis Publishing Ltd. 2005. 382 p.

147. Wang Y., Xu W., Li J., Song Y., Hua M., Li W., Wen Y., Li T., He X. Assessing the fractionation and bioavailability of heavy metals in soil-rice system and the associated health risk // *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44(2). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00876-4>

148. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. Vol. 59, № 7. P. 1217-1232.

149. Yu L., Zhang F., Zang K., He L., Wan F., Liu H., Zhang X., Shi Z. Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Cultivated Land Based on Soil Geochemical Zoning: Yishui County, North China Case Study // *Water*. 2021. Vol. 13(23). 3322. <https://doi.org/10.3390/w13233322>

150. Zhang R., Wu P., Ye H., Li X. Hydrogeochemical Characteristics and Quality Assessment of Mine Water in Coalfield Area, Guizhou Province, Southwest // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2021. Vol. 107(3). <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03322-4>

## References

1. Avtsyn, A., Zhavoronkov, A., Rish, M. and Strochkova, L., 1991. *Mikroelementozy cheloveka* [Human microelementoses]. Moscow, Meditsina. (in Russian)

2. Alekseyenko, V., Buzmakov, S. and Panin, M., 2013. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental Geochemistry]. Perm, Perm. state univ publ. 359 p. (in Russian)

3. Andreev, D. and Buzmakov, S., 2021. Anthropogenic transformation of forest ecosystems by geochemical and photosynthetic parameters. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 7(2), pp. 49-57.

4. Arestova, I., Opekunova, M., Opekunov, A. and Kukushkin, S., 2006. *Ekologo-geokhimicheskaya otsenka sostoyaniya prirodnoy sredy v rayonakh dobychi nefi* [Ecological and geochemical assessment of the state of the natural environment in oil production areas]. Geokhimiya biosfery. Moscow, Smolensk. Pp. 41-42. (in Russian)

5. Baturin, E., Menshikova, E., Blinov, S., Naumov, D. and Belkin, P., 2012. Problems of the development of the world largest potash deposits. *Modern problems of science and education*, (6). URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7513> (дата обращения: 09.10.2024).

6. Bakharev, P., Voronchikhina, Ye., Il'nykh, S. and Loskutova, N., 2012. *Tekhnofil'nyye elementy v osobo okhranyayemykh ekosistemakh Zapadnoural'skoy taygi* [Technophilic elements in specially protected ecosystems of the West Ural taiga]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 14(1-8), pp. 2136-2139. (in Russian)

7. Bachurin B., 2019. Ecology-geochemical estimation of oil degradation products under the hypergenesis condition. *Anthropogenic Transformation of Nature*, (5), pp. 8-14. (in Russian)

8. Beus, A., Grabovskaya, L. and Tikhonova, N., 1976. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra. 248 p. (in Russian)

9. Blinov, S., Maksimovich, N. and Men'shikova, Ye., 2003. Sovremennoye tekhnogennoye mineraloobrazovaniye v allyuvii rek Kizelovskogo yuzhnogo basseyna [Modern technogenic mineral formation in the alluvium of the rivers of the Kizelovsky southern basin]. *Mineralogiya tekhnogeneza*. 4, pp. 20-38. (in Russian)

10. Buzmakov, S., Andreev, D. and Dzijuba, E., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021620097 RF. Geoinformatsionnaya baza dannyh «Migratsiya uglevodorodov v vodoohrannoj zone Kamskogo vodohranilisha» [Certificate of state registration of the database No. 2021620097 of the Russian Federation. Geoinformation database "Migration of hydrocarbons in the water protection zone of the Kama reservoir"]. № 2020622892. (in Russian)

11. Buzmakov, S. and Dzijuba, E., 2023. Evaluation of Pollution of Soils with Potentially Toxic Elements in the Zone of Influence of Potassium Salt Mining. *Ecology and Industry of Russia*, 27(5), pp. 46-50. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-46-50> (in Russian)

12. Buzmakov, S., Dzijuba, E. and Sivkov, D., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021620098 RF. Geoinformatsionnaya baza dannyh geokhimicheskikh svoystv pochv landshaftnogo zakaznika Pre-dural'e [Certificate of state registration of the database No.

- 2021620098 of the Russian Federation. Geoinformation database of geochemical properties of soils of the Preduralie landscape reserve]. № 2020622893. (in Russian)
13. Buzmakov, S., Dzyuba, E. and Sivkov, D., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021620099 RF. Geoinformatsionnaya Baza dannyh geohimicheskikh svoystv pochv na territorii Permskogo kraja [Certificate of state registration of the database No. 2021620099 of the Russian Federation. Geoinformation database of geochemical properties of soils in the Perm territory]. № 2020622894. (in Russian)
14. Buzmakov, S., Sannikov, P., Sivkov, D., Dziuba, E., Khotyanovskaya, Y., Egorova, D., 2021. Development of geoinformation systems for environmental management and environmental safety in the areas of exploited oil deposits. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 7(1), pp. 102-127. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-102-127> (in Russian)
15. Buzmakov, S., Hotjanovskaja, Ju. and Andreev, D., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021621102 RF. Tehnogennaya transformatsiya prirodnoj sredy v karstovom rajone [Certificate of state registration of the database No. 2021621102 of the Russian Federation. Technogenic transformation of the natural environment in the karst area]. № 2021620770. (in Russian)
16. Vasil'yev, A. and Chashchi, A., 2011. *Tyazhelye metally v pochvakh goroda Chusovogo: otsenka i diagnostika za-gryazneniya* [Heavy metals in soils of the city of Chusovoy: assessment and diagnostics of pollution]. Perm, FGBOU VPO Permskaya GSKHA. 188 p. (in Russian)
17. Vernadskiy, V., 1936. Ob analize pochv s geokhimi-cheskoy točki zreniya [On the analysis of soils from a geochemical point of view]. *Eurasian Soil Science*. (1), pp.8-16. (in Russian)
18. Vernadskiy, V., 2001. *Khimicheskoye stroyeniye bio-sfery Zemli i yeye okruzheniya (Seriya «Biblioteka trudov akademika V.I. Vernadskogo»)* [Chemical structure of the Earth's biosphere and its environment (Series "Library of works of academician V.I. Vernadsky")]. Moscow, Nauka. 376 p. (in Russian)
19. Vinogradov, A., 1962. Sredniye sodержaniya khimi-cheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornyykh porod zemnoy kory [Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust]. *Geokhimiya*. 7, pp. 555-571. (in Russian)
20. Vinogradov, A., 1953. *Geokhimiya redkikh i rassyan-nykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils]. Moscow, Izd-vo AN SSSR. 237 p. (in Russian)
21. Vinogradov, A., 1960. O genezise biogeokhimicheskikh provintsiiy [On the genesis of biogeochemical provinces]. *Trudy Biogeokhimicheskoy laboratorii AN SSSR*. 11. (in Russian)
22. Vinogradov, A., 1952. Osnovnyye zakonomernosti raspredeleniya mikro-elementov mezhdru rasteniyami i sredoy // *Mikro-elementy v zhizni rasteniy i zhivotnykh*. Izd-vo AN SSSR. (in Russian)
23. Vinogradov, A., 1962. Sredneye sodержaniye khimicheskikh elementov v glavnykh tipakh izverzhennykh gornyykh porod zemnoy kory [Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust]. *Geokhimiya*. 7. (in Russian)
24. Vodyanitskii, Y., 2013. Contamination of soils with heavy metals and metalloids and its ecological hazard (analytic review). *Eurasian Soil Science*, (7), pp. 793-801. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13050171> (in Russian)
25. Vodyanitskii, Y., 2013. Sovremennyye tendentsii zagryazneniya pochv tyazhely-mi metallami [Modern trends of soil pollution with heavy metals]. *Agrokimiya*. (9), pp. 88-96. (in Russian)
26. Voronchikhina, Ye. and Blinov, S., 2013. Men'shikova Ye.A. Tekhnofil'nyye metally v yestestvennykh i urba-nizirovannykh ekosistemakh Permskogo kraja [Technophilic metals in natural and urbanized ecosystems of the Perm region]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. (1), pp. 103-108. (in Russian)
27. Voronchikhina, Ye., Zhdakayev, V., 2019. *Mysh'yak v yestestvennykh i tekhnogen-nykh geosistemakh Permskogo kraja [Arsenic in natural and technogenic geosystems of the Perm region]*. In: Osipova, V., Maksimovich, N., Baryakha, A., Buldakova, E., Demeneva, A., O.N. Ere-mina, V.G. Zaikanova, V.N. Kataeva, Mamaeva, Yu. and Meshcheryakova O. (ed.) *Proceedings of annual session of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology*. Pp. 278-283. (in Russian)
28. Gamm, T. and Gamm, A., 2015. *Issledovaniye zakono-mernostey rasprostraneniya ot istochnika zagryazneniya tyazhelykh metallov i nefteproduktov na mesto-rozhdenii nefi* [Study of the patterns of distribution of heavy metals and oil products from the source of pollution at an oil field]. *Nauka i mir*. 2-1(18), pp. 109-112. (in Russian)
29. Glazovskaya, M., 1988. *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR]. Moscow, Vysshaya shkola. 326 p. (in Russian)
30. Glazovskaya, M., *Geokhimiya prirodnykh i tekhnogennykh landshaftov SSSR* [Geochemistry of natural and technogenic landscapes of the USSR]. Moscow, Geograficheskii fakul'tet MGU. 305 p. (in Russian)
31. Glazovskaya, M., 1957. *Soderzhaniye metallov v pochvakh chereduyetsya. Geokhimicheskiye poiski rudnykh mestorozhdeniy v SSSR* [The content of metals in soils alternates. Geochemical prospecting of ore deposits in the USSR]. Moscow, Rosgeoltekhizdat. (in Russian)
32. Golik, V., Zaalishvili, V. and Razorenov, Yu., 2014. Problemy regional'noy ekologii Vostochnogo Donbassa [Problems of regional ecology of the Eastern Donbass]. *Problemy regional'noy ekologii*. (3), pp. 55-59. (in Russian)
33. Grigor'yev, N., 2009. *Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinental'noy kory* [Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust]. Ekaterinburg, UrO RAN. 382 p. (in Russian)
34. Dzyuba, E., 2022. *Geokhimicheskaya identifikatsiya antropogennoj transformatsii prirodnoj sredy na territorii Permskogo kraja* [Geochemical identification of anthropogenic transformation of the natural environment on the territory of the Perm territory]. Candidate's Dissertation of Sciences in Geography. Perm, 235 p.
35. Dzyuba, E., 2022. *Zagryazneniye pochv potentsial'no toksichnymi elementami pri ekspluatatsii nefitya-nykh mestorozhdeniy* [Soil pollution with potentially toxic elements during oil field exploitation]. In: *Modern Directions*

- of Geochemistry Development: Proceedings of All-Russian Conference (with Participation of Foreign Scientists) Dedicated to the 65th Anniversary of the A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry and the 105th Anniversary of the Birth of Academician L.V. Tauson, 21-25 November 2022, Irkutsk, Russia. Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Pp. 160-162. (in Russian)
36. Dzyuba, E., 2021. Determination of the local background content of some macro- and microelements in the soils of the Perm region. *Geographical Bulletin*, 1(56), pp. 95-108. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-95-108> (in Russian)
37. Dzyuba, E., 2024. Natural and technogenic geochemical zoning of the Perm region. *Geographical Bulletin*, 3(70), pp. 139-151. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-3-139-151> (in Russian)
38. Dobrovolskiy, V., 1988. Biogeokhimicheskiye tsikly tyazhelykh metallov [Biogeochemical cycles of heavy metals]. *Geokhimiya*. (2). (in Russian)
39. Dobrovolskiy, V., 1983. *Geografiya mikroelementov. Global'noye rasseyaniye* [Geography of microelements. Global dispersion]. Moscow, Mysl'. (in Russian)
40. Dobrovolskiy, V., 1963. Raspredeleniye rassayannyykh khimicheskikh elementov mezhdru pochvoobrazuyushchey porodoy, pochvoy i rastitel'nost'yu v usloviyakh Podmoskov'ya [Distribution of dispersed chemical elements between parent rock, soil and vegetation in the Moscow region]. *Nauch. doklady vysshey shkoly. Biol. nauki*. (3). (in Russian)
41. Dobrovolskiy, V., 1980. *Khimiya Zemli* [Chemistry of the Earth]. Moscow, Prosveshcheniye. (in Russian)
42. Dorozhukova, S. and Yanin, Ye., 2006. Burovyeye ambari kak istochniki zagryazneniya prirodnykh vod v nefte-dobyvayushchikh rayonakh [Drilling pits as sources of pollution of natural waters in oil-producing regions]. *Geokhimiya biosfery*. pp. 123-125. (in Russian)
43. Yeremchenko, O., Mitrakova, N. and Shestakov, I., 2017. Prirodno-tekhnogennaya organizatsiya pochvenno-go pokrova territorii vozdeystviya soleotvalov i shlamokhranilishch v Solikamsko-Bereznikovskom ekonomicheskoy rayone [Natural and technogenic organization of the soil cover of the territory affected by salt dumps and sludge storage facilities in the Solikamsk-Bereznikovskiy economic region]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya Biologiya*. 3, pp. 311-320. (in Russian)
44. Yeremchenko, O., Moskvina, N., Shestakov, I. and Shvetsov, A., 2014. Ispol'zovaniye test-kul'tur dlya otsenki ekologicheskogo sostoyaniya gorodskikh pochv [Use of test cultures for assessing the ecological state of urban soils]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki*. 19(5), pp.1280-1284. (in Russian)
45. Yeremchenko, O., Shestakov, I., Moskvina, N., 2016. *Pochvy i tekhnogennyye poverkhnostnyye obrazovaniya urbanizirovannykh territoriy Permskogo Prika-m'ya* [Soils and technogenic surface formations of urbanized territories of Perm Prikamye]. Perm, PSU. 252 p. (in Russian)
46. Zakrutkin, V., Zubova, L., Gibkov, Ye., Zubov, A. and Vorob'yev, S., 2017. Terrikony uglepromyshlennykh rayonov Donbassa kak istochnik vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu [Waste heaps of coal-mining regions of Donbass as a source of environmental impact]. *Izvestiya vysshiykh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki*. 3-1(195-1), pp. 69-75. (in Russian)
47. Zyrin, N., 1968. Raspredeleniye i var'irovaniye sodержaniya mikroelementov v pochvakh russkoy ravniny [Distribution and variation of microelement content in soils of the Russian plain // Soil Science]. *Eurasian Soil Science*. 7. (in Russian)
48. Zyrin, N., Belitsina, G. and Brysova, N., 1961. Soderzhaniye mikroelementov semeystva zheleza v nekotorykh pochvakh SSSR [Content of microelements of the iron family in some soils of the USSR]. *Vestnik MGU. Ser. 6*. (5). (in Russian)
49. Ilarionov, S., 2004. *Ekologicheskiye aspekty vostanovleniya neftezagryaznennykh pochv* [Ecological aspects of restoration of oil-contaminated soils]. Ekaterinburg, UrO RAN. 192 s. (in Russian)
50. Kazakova, N., 2009. Zagryazneniye pochvy tyazhelymi metallami [Soil pollution with heavy metals]. *Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. (1), pp. 29-31. (in Russian)
51. Kasimov, N. and Vlasov, D., 2015. Klarki khimicheskikh elementov kak etalony sravneniya v ekogeokhimi [Clarkes of chemical elements as comparison standards in ecogeochemistry]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*. (2), pp. 7-17. (in Russian)
52. Koval'skiy, V., 1973. *Geokhimicheskaya ekologiya* [Geochemical ecology]. Moscow, Nauka. (in Russian)
53. Koval'skiy, V. and Andrianova, G., 1973. *Mikroelementy v pochvakh SSSR* [Microelements in soils of the USSR]. Moscow, Nauka. (in Russian)
54. Kovda, V., Yakushevskaya, I., Tyuryukanov, A., 1959. *Mikroelementy v pochvakh Sovetskogo Soyuz* [Microelements in Soils of the Soviet Union]. Moscow, Izd-vo MGU. (in Russian)
55. Kopylov, I., 2011. Kontseptsiya i metodologiya geoeologicheskikh issledovaniy i kartografirovaniya platformnykh regionov [Concept and methodology of geoeological research and mapping of platform regions]. *Perspektivy nauki*. 8(23). pp. 126-129. (in Russian)
56. Kopylov, I., 2012. Litogeokhimicheskiye anomal'nyye zony Zapadnogo Urala i Priural'ya [Lithogeochemical anomalous zones of the Western Urals and the Urals // Bulletin of Perm University]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 2(15), pp. 16-34. (in Russian)
57. Kopylov, I., 2011. Osobennosti geokhimicheskikh poley i litogeokhimicheskiye anomal'nyye zony Zapadnogo Urala i Priural'ya [Features of geochemical fields and lithogeochemical anomalous zones of the Western Urals and the Urals]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*. 1(10). pp. 26-37. (in Russian)
58. Kopylov, I. and Dal', L., 2015. Tipizatsiya i rayonirovaniye landshaftno-geokhimicheskikh sistem [Typification and zoning of landscape-geochemical systems]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. (2), p. 772. (in Russian)
59. Kropachev, A. and Belozerova, Ye., 1998. Landshaftno-geokhimicheskoye rayonirovaniye territorii Permskoy oblasti [Landscape-geochemical zoning of the Perm region]. *Problemy geologii Permskogo Urala i Predural'ya*. Pp. 26-27. (in Russian)
60. Liskova, M., 2017. Negative impact on the environment caused by companies that mine and process

- potassium and magnesium salts. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 16(1), pp.82-88. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2017.1.9> (in Russian)
61. Maksimovich, N., Kazakevich, S. and Nikiforov, V., 2005. Rol' karsta v formirovaniy neftyanogo zagryazneniya gidrosfery v rayone p. Polazna [The role of karst in the formation of oil pollution of the hydrosphere in the area of the village of Polazna]. In: *Geology and Useful Minerals of the Western Urals: Proceedings of Regional Scientific and Practical Conference*. pp. 290-295. (in Russian)
62. Maksimovich, N. and Meshcheryakova, O., 2009. Metody bor'by s neftyanym zagryazneniyem na zakarstovannykh beregakh vodokhranilishch [Methods for combating oil pollution on karst banks of reservoirs]. *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy*. (4), pp. 55-58. (in Russian)
63. Maksimovich, N., Meshcheryakova, O., P'yankov, S. and Khayrulina Ye., 2017. *Ekologo-geokhimicheskiye problemy ugol'nykh mestorozhdeniy i puti ikh resheniya [Ecological and Geochemical Problems of Coal Deposits and Ways of their Solution]*. In: Karabanova, A. (ed.) *Geology and Mineral Resources of the West of The East European Platform: Problems of Study and Rational Use: Proceedings of International Scientific Conference Dedicated to the 215th Anniversary of the Birth of I. Domeyko*. Pp. 291-294. (in Russian)
64. Maksimovich, N. and P'yankov, S., 2018. *Kizelovskiy ugol'nyy basseyn: ekologicheskiye problemy i puti resheniya [Kizelovsky coal basin: environmental problems and solutions]*. Perm, PSU publ. 288 p. (in Russian)
65. Maksimovich, N. and Khayrulina, Ye., 2011. *Geokhimicheskiye bar'yery i okhrana okruzhayushchey sredy [Geochemical barriers and environmental protection]*. Perm, PSU publ. 248 p. (in Russian)
66. Mekhonoshina, E., Kopytov, S., Sannikov, P. and Shumilovskikh, L., 2022. The database of Late Pleistocene and Holocene paleoarchives in the Perm Kama region – PaleoPerm. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 8(1), pp.58-77. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2022-1-58-77> (in Russian)
67. Meshcheryakova, O., 2015. Zonirovaniye zakarstovannykh territoriy po stepeni ustoychivosti k neftyanomu zagryazneniyu [Zoning of karst territories by degree of resistance to oil pollution]. *Geologiya i poleznye iskopayemye zapadnogo Urala*. (15), pp. 136-139. (in Russian)
68. Meshcheryakova, O. and Maksimovich, N., 2011. *Osobennosti neftyanogo zagryazneniya karstovykh rayonov [Features of oil pollution of karst regions]*. In: Iblaminov, R. (ed.) *Geology and Mineral Resources of the Western Urals: Proceedings of Jubilee Conference Dedicated to the 80th Anniversary of the Geological Faculty and the 95th Anniversary of Perm State University, 2011*. Perm, Russia. Perm, PSU. Pp. 188-190. (in Russian)
69. Motuzova, G., 2013. *Soyedineniya mikroelementov v pochvakh: sistemnaya organizatsiya, ekologicheskoye znachenie, monitoring [Microelement compounds in soils: system organization, ecological significance, monitoring]*. Mpscow, Knizhnyy dom «LIBRO-KOM». 168 p. (in Russian)
70. Nikiforova, Ye. and Solntseva, N., 1982. *Geokhimiya tekhnogennykh potokov i oreolov zagryazneniya v rayonakh ugledobychi (na primere Kizelovskogo basseyna)*. *Geokhimiya landshaftov i geografii pochv [Geochemistry of technogenic flows and pollution halos in coal mining areas (using the Kizelovsky basin as an example). Geochemistry of landscapes and soil geography]*. Moscow: Izd-vo MGU. (in Russian)
71. Nikiforova, Ye., Solntseva, N., Sorokina, N., 1983. *Geokhimiya tyazhelykh metallov v prirodnykh i tekhnogennykh landshaftakh [Geochemistry of heavy metals in natural and technogenic landscapes]*. Moscow, Izd-vo MGU. (in Russian)
72. Oborin, A., Khmurchik, V., Ilarionov, S., Makarova M. and Nazarov, A., 2008. *Neftzagryaznennyye biotsenozy [Oil-polluted biocenoses]*. Perm: PSU. 511 p. (in Russian)
73. Oborin, A., Shishkin, M., Odintsova, T., 1990. *O prirode neftyanogo zagryazneniya Kamskogo vodokhranilishcha v rayone Polaznenskogo neftepromysla [On the nature of oil pollution of the Kama Reservoir in the area of the Polaznenskoye oil field]*. In: *Factors and Mechanisms Regulating the Development of Bacterial Populations: Collection of scientific papers*. Pp. 70-73. (in Russian)
74. Opekunov, A., Opekunova, M., Kukushkin, S., Ganul, A., 2012. Assessment of the state of environment in the oil and gas development region of the Yamalo-Nenetsky autonomous region. *Vestnik of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography*, (4), pp. 87-101. (in Russian)
75. Opekunov, A., Opekunova, M., Somov, V., Mitrofanova, E. and Kukushkin S., 2018. Influence of the exploitation of Sibay deposit (the Southern Urals) on the transformation of metal migration in subordinate landscapes. *Lomonosov Geography Journal*, (1), pp. 14-24. (in Russian)
76. Opekunova, M., Opekunov, A., Kukushkin, S. and Arestova I., 2007. Indicators of antropogenic pressure at natural complex of oil-gas condensed deposits of the ymalo-nenetsk region. *Vestnik of St. Petersburg State University. Series 7. Geology. Geography*, (1), pp. 124-127. (in Russian)
77. Opekunova, M., Opekunov, A., Kukushkin, S. and Ganul, A., 2019. Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, (4), pp. 422-439. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19020114> (in Russian)
78. Opekunova, M., Opekunov, A., Kukushkin, S. and Lisenkov S., 2020. *Results of complex ecological and biogeochemical research of landscape in the Arctic oil and gas areas*. In: *Integrated Studies of the Natural Environment of the Arctic and Antarctic: Proceedings of International Scientific Conference, 02-04 March 2020, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg, Arctic and Antarctic Research Institute, pp. 122-125. (in Russian)
79. Opekunova, M., Opekunov, A., Kukushkin, S., Lisenkov S., Vlasov, S., Somov, V., 2022. Soil pollution with polycyclic aromatic hydrocarbons and petroleum hydrocarbons in the north of Western Siberia: spatial pattern and ecological risk assessment. *Eurasian Soil Science*, (11), pp. 1442-1460. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22110107> (in Russian)
80. Opekunova, M., 2018. Use of bioindication and biotesting methods in assessing the ecological state of the territory of gas condensate deposits in the north of Western Siberia. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 63(3), pp. 326-344. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2018.305> (in Russian)

81. Eglinton J. and Murphy M. (ed.), 1974. *Organic Geochemistry*. Leningrad, Nedra. 487 p. (in Russian)
82. Perel'man, A., 1989. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola. 407 p. (in Russian)
83. Pikovskiy, Yu., Gennadiyev, A., Krasnopeyeva, A. and Puzanova, T., 2009. Geokhimicheskiye polya uglevodorodov v pochvakh neftyanogo mestorozhdeniya [Hydrocarbon geochemical fields in soils of the oil field]. *Lomonosov Geography Journal*. (5), pp. 28-34. (in Russian)
84. Pikovskiy, Yu., Gennadiyev, A. And Oborin, A., 2008. Uglevodorodnoye sostoyaniye pochv na territorii nefteobychi s karstovym rel'yefom [Hydrocarbon state of soils in oil production areas with karst relief]. *Eurasian Soil Science*. (11), pp. 1314-1323. (in Russian)
85. Pikovskiy, Yu., Smirnova, M., Kovach, R., Puzanova, T., Khlynina, A. and Khlynina, N., 2014. Povedeniye uglevodorodov v karstovyykh landshaftakh [Behavior of hydrocarbons in karst landscapes]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. (9-10), pp. 133-143. (in Russian)
86. Porozova, A. and Sannikov, P., 2021. Assessment of the impact of associated gas flaring on the radial growth of *Pinus sylvestris* (Ozernoe oil field, Perm region, Russia). *Anthropogenic Transformation of Nature*, 7(2), pp. 58-74. (in Russian)
87. Sayet, Yu., Rayevich, B., Smirnova, R., Sorokina, Ye. and Sarkisyan, S., 1985. Gorod kak tekhnogenyy subregion biosfery [City as a technogenic subregion of the biosphere]. *Biogeokhimicheskoye rayonirovaniye i geokhimicheskaya ekologiya*. Moscow, Nauka. Pp. 133-166. (in Russian)
88. Sannikov, P., 2019. Preservation of steppe communities in Perm region: list of priority objects. *Problems of steppe science*, (15), pp. 295-299. (in Russian)
89. Sannikov, P., Andreev, D., and Buzmakov, S., 2018. Identification and analysis of deadwood using an unmanned aerial vehicle. *Sovremennyye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 15(3), pp. 103-113. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-3-103-113> (in Russian)
90. Sannikov, P., Kopytov, S., Igosheva, E., Mekhonoshina, E., Novikova, E., Pekhtereva, M., Solovyova, E. and Samarkina, A., 2024. Morphometric parameters estimation for bog depression lakes in the north of the Perm Kamaregion. *Geographical Bulletin*, 2(69), pp. 109-123 <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-2-109-123> (in Russian)
91. Socolov, E., Maximovich, N. and Mesherykova, O., 2015. Forming oil polluting sulfate massif in karstic regions and methods of their liquidation. *Izvestiya tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*, (2), pp. 79-89. (in Russian)
92. Solntseva, N., 1998. *Dobycha nefi i geokhimiya prirodnykh landshaftov* [Oil production and geochemistry of natural landscapes]. Moscow: Izd-vo MGU. 369 p. (in Russian)
93. Solntseva, N. and Nikiforova, Ye., 1984. Vliyaniye ugledobychi na geokhimiyu landshaftov (na primere Podmoskovnogo i Kizelovskogo basseynov) [The influence of coal mining on the geochemistry of landscapes (using the Moscow and Kizelovsky basins as an example)]. *Okhrana geologicheskoy sredy ot otritsatel'nogo vliyaniya predpriyatiy gornodo-byvayushchego profilya*. Moscow, Izd-vo MGU. pp. 189-192. (in Russian)
94. Solntseva, N. and Nikiforova, Ye., 1978. Kadmiy, svinets i tsink v pochvakh Kizelovskogo ugol'nogo basseyna [Cadmium, lead and zinc in soils of the Kizelovsky coal basin]. *Geokhimiya tyazhelykh metallov v prirodnykh i tekhnogennykh landshaftakh*. Moscow, Izd-vo MGU. Pp. 150-167. (in Russian)
95. Sochava, B., 1978. *Vvedeniye v ucheniye o geosistemakh* [Introduction to the Doctrine of Geosystems]. Novosibirsk, Nauka. 319 p. (in Russian)
96. Troitskiy, Ye., 1960. Osnovnyye problemy ucheniya o mikroelementakh v sisteme pochva-rasteniye [Basic problems of the theory of microelements in the soil-plant system]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seria Biologia*. (5). (in Russian)
97. Turkovskaya, O., Muratova, A., Dubrovskaya, E., Bondarenkova, A. and Lyubun, E., 2020. Phytoremediation potential of Sorghum bicolor for soil decontamination from oil hydrocarbons and heavy metals. *The Agrarian Scientific Journal*, (12), pp. 50-54. <https://doi.org/10.28983/asj.v2020i12pp50-54> (in Russian)
98. Fedorov, Y., Sukhorukov, V., Trubnik, R., 2021. Review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. Ecological problems. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 7(1), pp. 6-34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34> (in Russian)
99. Fersman, A., 1933. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Leningrad, Goskhimtekhnizdat. 328 p. (in Russian)
100. Khayrulina, E., Mitrakova, N., Novoselova, L. and Poroshina, N., 2021. Soil and vegetation transformation under the influence of the pouring out ancient brine wells in Perm krai. *Geographical Bulletin*, 4(59), pp. 113-129. (in Russian)
101. Khayrulina, E., Nikiforova, Ye., and Voronchihina E., 2011. Transboundary pollution impact on biogeochemical transformation of taiga-mountain landscapes. *Theoretical and Applied Ecology*, (1), pp. 61-68. (in Russian)
102. Khayrulina, E., Novoselova, L. and Poroshina, N., 2017. Natural and anthropogenic sources of soluble salts on the territory of the upper Kama potash deposit. *Geographical bulletin*, 1(40), pp. 93-101. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2017-1-93-101> (in Russian)
103. Khayrulina, E., Novoselova, L. Shestakov, I. and Bogush, A., 2018. Formation of Natural-Technogenic Landscapes at Potash Mining Deposits. *Novyye metody i rezul'taty landshaftnykh issledovaniy v Yevrope, Sredney Azii i Sibiri*, pp. 220-223. (in Russian)
104. Khoroshevskaya, V., 2012. Zakonomernost' migratsii biometallov na geokhimicheskikh bar'yerakh «susha-voda» v rayonakh zaleganiya yuzhnykh plastov i ikh promyshlennyye razrabotki (na primere Donetskogo ugol'nogo basseyna) [Patterns of biometal migration on land-water geochemical barriers in areas of southern seams and their industrial development (using the Donetsk coal basin as an example)]. *Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 1(57), pp. 206-213. (in Russian)
105. Khotyanovskaya, Yu., Buzmakov, S. and Kuchin, L., 2023. Geocological regularities of the natural environment transformation during the exploitation of an oil field in a karst region. *Geographical Bulletin*, 1(64), 127-138. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-1-127-138> (in Russian)
106. Chernikov, A., 2002. *Osobennosti formirovaniya geokhimicheskikh bar'yerov v pripoverkhnostnoy i glubinnoy*

- zonakh gipergeneza [Features of the formation of geochemical barriers in the near-surface and deep zones of hypergenesis]. *Geokhimiicheskiye bar'yery v zone gipergeneza*. Moscow, Izd-vo MGU. Pp. 154-161. (in Russian)
107. Shkol'nik, M., 1950. *Znachenkiye mikroelementov v zhizni rasteniy i v zemledelii* [The Importance of Microelements in Plant Life and Agriculture]. Moscow, Izd-vo AN SSSR. (in Russian)
108. Yanin, Ye., 2018. Osnovnyye obobshcheniya geokhimi i teoreticheskoy bazy i metodologicheskoye printsiy izucheniya tekhnogenogo zagryazneniya biosfery (k 155-letiyu so dnya rozhdeniya V.I. Vernadskogo) [Basic generalizations of geochemistry as a theoretical basis and methodological principles for studying technogenic pollution of the biosphere (on the 155th anniversary of V.I. Vernadsky's birth)]. *Nauchnyye i tekhnicheskkiye aspekty okhrany okruzhayushchey sredy*. (4), pp. 2-24. (in Russian)
109. Ahmadi, M., Jorfi, S., Azarmansuri, A., Jaafarzadeh, N., Mahvi, A., Darvishi C., Akbari, H., Akhbarizadeh, R., 2017. Zoning of heavy metal concentrations including Cd, Pb and As in agricultural soils of Aghili plain, Khuzestan province, Iran. *Data in Brief*, 14, pp. 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.07.008>
110. Ayari, J., Barbieri, M., Barhoumi, A., Belkhiria, W., Braham, A., Dhaha, F. and Charef, A., 2022. A regional-scale geochemical survey of stream sediment samples in Nappe zone, northern Tunisia: Implications for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 235(4). <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106956>
111. Baure, M., Eichinger, L., Elsass, P., Kloppmann, W. and Wirsing, G., 2005. Isotopic and hydrochemical studies of groundwater flow and salinity in the Southern Rhine Graden. *Int. J. Earth Sci.*, 94, pp. 565-579. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0500-5>
112. Bian, Z. and Lu, Q., 2013. Ecological effects analysis of land use change in coal mining area based on ecosystem service valuing: A case study in Jiawang. *Environmental Earth Sciences*, 68(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1855-0>
113. Cardoso, A., Mainardi, F., 2021. A first evaluation of water resource conditions after an environmental reclamation effort at a former degraded coal mining area in Southern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09393-4>
114. Daliakopoulou, I., Tsanisab, I., Koutroulisa, A., Kourgialasa, N., Varouchakisa, A., Karatzasa, G., Ritsemac, C., 2016. The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of The Total Environment*, 573, pp. 727-739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177>
115. Dziuba, E., Buzmakov, S., Khotyanovskaya, Yu., 2023. Study of geochemical features of soils on the territory of an abandoned coal mining area using geoinformation technologies. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(12), pp. 9135-9155. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01534-7>
116. Fazekasova, D., Fazekas, J. and Stofejova, L., 2021. Metal pollution assessment of surface water in the emission field of the slovinky tailing impoundment (Slovakia). *Water*, 13(21), 3143. <https://doi.org/10.3390/w13213143>
117. Fiedler, S., Siebe, C., Herre, A., Roth, B., Cram, S. and Stahr, K., 2009. Contribution of oil industry activities to environmental loads of heavy metals in the Tabasco lowlands, Mexico. *Water Air Soil Pollut*, 197, pp. 35-47.
118. Gao, S., Luo, T.-C. and Zhang, B.-R., 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 62(11), pp. 1959-1975.
119. Gatina, E., Zinicovscaia, I., Yushin, N., Chaligava, O., Frontasyeva, M. and Sharipova, A., 2024. Assessment of the Atmospheric Deposition of Potentially Toxic Elements Using Moss *Pleurozium schreberi* in an Urban Area: The Perm (Perm Region, Russia) Case Study. *Plants*, 13(17), 2353. <https://doi.org/10.3390/plants13172353>
120. Goldschmidt, V., 1933. *Grundlagen der quantitativen Geochemie*. Fortschr. Mineral. Kinst. Petrogr. (in German)
121. Hu, H., Han, L., Li, L., Wang, H. and Xu, T., 2021. Soil heavy metal pollution source analysis based on the land use type in Fengdong District of Xi'an, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(10). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09377-4>
122. Hu, Z. and Gao, S., 2008. Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chem. Geol.* 253(3-4), pp. 205-221.
123. Jung, H., Lim, D., Xu, Z., Kim, J., Lee, J., Jeong, D., 2021. Zoning of coastal environments based on sediment textural and geochemical characteristics and their major oceanographic constraints: A case study in South Korea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 218, 104883. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2021.104883>
124. Khayrulina, E., Bogush, A., Novoselova, L. and Mitrakova, N., 2021. Properties of Alluvial Soils of Taiga Forest under Anthropogenic Salinisation. *Forests*, 12, pp. 321. <https://doi.org/10.3390/f12030321>
125. Khayrulina, E., Khmurchik, V., Maksimovich, N., 2016. *The Kizel Coal Basin (The Western Urals, Russia): Environmental problems and Solutions. In: Mining Meets Water – Conflicts and Solutions: Proceedings IMWA 2016 Annual Conference*, pp. 761-767.
126. Long, J., Tan, D., Deng, S. and Lei, M., 2018. Pollution and ecological risk assessment of antimony and other heavy metals in soils from the world's largest antimony mine area, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(3), pp. 602-613. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1396531>
127. Magno, M., Luffman, I. and Nandi, A., 2021. Evaluating spatial regression-informed cokriging of metals in soils near abandoned mines in bumpus cove, Tennessee, USA. *Geosciences*, 11(11), 434. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110434>
128. Martinez-Lopez, S., Martinez-Sanchez, M., Gomez-Martinez, M. and Perez-Sirvent, C., 2020. Arsenic zoning in a coastal area of the Mediterranean Sea as a base for management and recovery of areas contaminated by old mining activities. *Applied Clay Science*, 199, 105881. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105881>
129. Nassiri, O., Laarabi, E., Hachimi, M., Ambrosi, J. and Rhoujjati, A., 2021. Contamination impact and human health risk in surface soils surrounding the abandoned mine of Zeida, High Moulouya, Northeastern Morocco. *Environment Development and Sustainability*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01380-6>

130. Nitzsche, N., Siebel, W. and Stober, I., 2024. Geologische, hydrogeologische und anthropogene Einflüsse auf die Wasserchemie der Möhlin, Schwarzwald – eine Momentaufnahme. *Grundwasser Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie*, 26, pp.175-189. <https://doi.org/10.1007/s00767-021-00480-4> (in German)
131. Ogbo, E. and Okhuoya, J., 2011. Bioavailability of some heavy metals in crude oil contaminated soils remediated with *Pleurotus tuber-regium* Fr. Singer. *Asian J. Biol. Sci.*, 4, pp. 53-61.
132. Opekinov, A., Opekinova, M., Kukushkin, S. and Lisenkov, S., 2022. Impact of drilling waste pollution on land cover in a high subarctic forest-tundra zone. *Pedosphere*, 32, pp. 414-425. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60083-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60083-8)
133. Pashkevich, M., Bech, J., Matveeva, V., and Alekseenko, A., 2020. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*, 241(1), pp. 125-130. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.125>
134. Podlipskiy, I., Dubrova, S., Zelenkovskiy, P., Lebedev, S., Izosimova, O., Chernova, E., Nesterov, E. and Egorov, P., 2020. Geocological zoning of modern geological objects composed of technogenic soils. Distribution of Zn, Cu, Pb, Fe, Hg and As in technogenic dispersed soils and bottom sediments. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 579(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/579/1/012016>
135. Polemio, M., Dragone, V. and Limoni, P., 2009. Monitoring and methods to analyse the groundwater quality degradation risk in coastal karstic aquifers (Apulia, Southern Italy). *Environmental Geology*, 58, pp. 299-312.
136. Pyankov, S., Maximovich, N., Khayrulina, E., Bezzina, O., Shikhov, A. and Abdullin, R., 2021. Monitoring Acid Mine Drainage's Effects on Surface Water in the Kizel Coal Basin with Sentinel-2 Satellite Images. *Mine Water and the Environment*, 40(3). <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00761-7>
137. Redondo-Vega, J., Melon-Nava, A., Pena-Perez S., Santos-Gonzalez, J., Gomez-Villar, A. and Gonzalez-Gutierrez, R., 2021. Coal pit lakes in abandoned mining areas in León (NW Spain): characteristics and geocological significance. *Environmental Earth Sciences*, 80(24). <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10037-6>
138. Rezaei, H., Mehrabi, B., Khanmirzaee, A. and Shahbazi, K., 2019. Arsenic heavy metal mapping in agricultural soils of Alborz province, Iran. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 101, pp. 127-139. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1661398>
139. Rudnick, R. and Gao, S., 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 3, pp. 1-64.
140. Ruppen, D., Chituri, O., Meck, M., Pfenninger, N. and Wehrli, B., 2021. Community-Based Monitoring Detects Sources and Risks of Mining-Related Water Pollution in Zimbabwe. *Frontiers in Environmental Science*. 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.754540>
141. Rustamov, G. and İsmaylova, L., 2022. Geochemistry landscape classification: toxicity of chemical elements and their impact on human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(1), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00747-4>
142. Shaw, D., Dostal, J. and Keays, R., 1976. Additional estimates of continental surface Precambrian shield composition in Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40(1), pp. 73-83.
143. Silva, R., Silva, Y., Straaten, P., Nascimento, C., Biondi, C., Silva, Y. and Araujo Filho, J.C., 2022. Influence of parent material on soil chemical characteristics in a semi-arid tropical region of Northeast Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*. 194(5). [https://doi.org/10.11137/2018\\_2\\_397\\_409](https://doi.org/10.11137/2018_2_397_409)
144. Solgi, E., Jalili, M., 2021. Zoning and human health risk assessment of arsenic and nitrate contamination in groundwater of agricultural areas of the twenty two village with geostatistics (Case study: Chahardoli Plain of Qorveh, Kurdistan Province, Iran). *Agricultural Water Management*, 255, 107023. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.107023>
145. Taylor, S. and McLennan, S., 1985. *The continental crust: Its composition and evolution*. Oxford, Blackwell Sci. Publ. 330 p.
146. Waltham, T., Bell, F. and Culshaw, M., 2005. *Sinkholes and subsidence. Karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Chichtster, Praxis Publishing Ltd. 382 p.
147. Wang, Y., Xu, W., Li, J., Song, Y., Hua, M., Li, W., Wen, Y., Li, T. and He, X., 2022. Assessing the fractionation and bioavailability of heavy metals in soil-rice system and the associated health risk. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(2). <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00876-4>
148. Wedepohl, K., 1995. The composition of the continental crust. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(7), pp. 1217-1232.
149. Yu, L., Zhang, F., Zang, K., He, L., Wan, F., Liu, H., Zhang, X. and Shi, Z., 2021. Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Cultivated Land Based on Soil Geochemical Zoning: Yishui County, North China Case Study. *Water*, 13(23), 3322. <https://doi.org/10.3390/w13233322>
150. Zhang, R., Wu, P., Ye, H. and Li, X., 2021. Hydrogeochemical Characteristics and Quality Assessment of Mine Water in Coalfield Area, Guizhou Province, Southwest. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(3). <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03322-4>

Статья поступила в редакцию 15.10.2024; одобрена после рецензирования 22.10.2024; принята к публикации 26.11.2024.

The article was submitted 15.10.2024; approved after reviewing 22.10.2024; accepted for publication 26.11.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья

 УДК 504.3.054, 504.064.36 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-42-64> EDN SNSGBA**Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния примеси в атмосферном воздухе****Алсу Валерьевна Семакина**

Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

[alsen13@list.ru](mailto:alsen13@list.ru)

**Аннотация.** Математическое моделирование, позволяет с теоретической точки зрения объяснить количественные и качественные характеристики состояния атмосферного воздуха, решать диагностические и прогностические задачи, восполнять недостающую информацию о характере рассеяния примеси в атмосферном воздухе. В ходе исследования атмосферных процессов, формировались различные подходы в их оценке и моделировании. Целью данной работы является обзор и анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов рассеяния примесей в атмосфере. Для реализации данной цели были сформулированы следующие задачи: выявление классификационных критериев для формирования классификаций математических моделей; анализ существующих подходов к математическому моделированию, в том числе с применением классификационных критериев. В результате проведенного исследования была проведена классификация существующих математических моделей, сделаны выводы о возможности применения математических моделей при оценке процессов рассеяния для разных территорий. Использование моделей на основе аналитического решения уравнения диффузии и гауссовых моделей допустимо только для небольших по площади территорий. В рамках характеристики состояния атмосферного воздуха больших по площади территорий при помощи методов математического моделирования, рекомендуются модели градиентного переноса с учетом химической активности веществ, адаптированные для определения процессов переноса примесей над разными по площади территориями.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, атмосферный воздух, классификация

**Для цитирования:** Семакина А.В. Основные математические подходы для оценки процессов рассеяния примеси в атмосферном воздухе // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 42-64. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-42-64>. EDN SNSGBA.

## SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

**The main mathematical approaches for modelling impurity scattering processes in atmospheric air****Alsu V. Semakina**

Udmurt State University, Izhevsk, Russia

[alsen13@list.ru](mailto:alsen13@list.ru)

**Abstract.** Mathematical modeling allows, from a theoretical point of view, to explain the quantitative and qualitative characteristics of the state of atmospheric air, solve diagnostic and prognostic problems, and fill in the missing information about the nature of the scattering of impurities in atmospheric air. During the study of atmospheric processes, various approaches were formed in their assessment and modeling. The purpose of this work is to review and analyze existing approaches to mathematical modeling of the processes of scattering of impurities in the atmosphere. To achieve this goal, the following tasks were formulated: identification of classification criteria for the formation of classifications of mathematical models; analysis of existing approaches to mathematical modeling, including using classification criteria. As a result of the conducted research, the classification of existing mathematical models was carried out, conclusions were drawn about the possibilities of using mathematical models in assessing scattering processes for different territories. The use of models based on the analytical solution of the diffusion equation and Gaussian models is acceptable only for small areas. Within the framework of characterizing the state of atmospheric air in large areas using mathematical modeling methods, gradient transport models are recommended, taking into account the chemical activity of substances adapted to determine the processes of impurity transfer over territories of different areas.

**Keywords:** mathematical modeling, atmospheric air, classification

**For citation:** Semakina, A., 2024. The main mathematical approaches for modelling impurity scattering processes in atmospheric air. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 43-65. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-42-64>. EDN SNSGBA. (in Russian)

Математическое моделирование, позволяет с теоретической точки зрения объяснить количественные и качественные характеристики состояния атмосферного воздуха, решать диагностические и прогностические задачи, восполнять недостающую информацию о характере рассеяния примеси в атмосферном воздухе [85]. В ходе исследования атмосферных процессов, формировались различные подходы в их оценке и моделировании. Основы атмосферной диффузии примеси были сформулированы Дж. Тейлором, Фридрихом, Келлером. Теоретическое обоснование результатов наблюдений процессов турбулентной диффузии в пограничных слоях атмосферы содержится в работах А.С. Мониной, А.М. Обухова, А.М. Яглома [67-70, 77], М.Е. Берлянда [19, 20], Д.Л. Лайхмана [55], С.С. Зилитинкевича [45], Р.В. Озмидова [70]. Одномерная дифференциальная модель диффузии примеси была разработана А.В. Левиным [56]. Статистический подход был развит О.Г. Сеттоном [96]. Численные методы исследования диффузии примеси в турбулентной среде были успешно развиты группой советский ученых под руководством Г.И. Марчука [53, 59]. Основы геофизической теории турбулентности сформулированы в работах [29, 52, 69-72, 106]. К работам по эмпирическому исследованию пограничных слоев атмосферы относятся [5, 104, 164]. Распространение примеси в турбулентной среде рассматривалось в [30, 50, 78, 134].

Можно выделить 4 исторических этапа в развитии моделирования процессов переноса примесей в атмосфере:

I этап (60–70 гг. XX в.). На этом этапе формулируются уравнения переноса веществ в атмосфере, проводятся первые численные эксперименты [59, 62, 63, 82].

II этап (70–80 гг. XX в.). Характеризуется усложнением исходных уравнений с учетом таких факторов как трансформация ЗВ, их химическое взаимодействие [81]. При этом Чернобыльская катастрофа дала значительный толчок в развитии этого направления [15, 22, 31, 48, 92, 122].

III этап (80-е гг. XX в. – 2000-е гг.). Происходит дальнейшее углубление постановок задач для изучаемого явления (рассматриваются сложные сценарии распространения примеси в атмосфере, учитывающие химические реакции между примесями, солнечную радиацию, выбросы автотранспорта в условиях города) [1, 2, 4, 18, 19, 24, 32, 33, 37, 41, 49, 60, 61, 84, 85, 89, 121, 130, 138, 139, 140, 153, 160].

IV этап (2000-е гг. – настоящее время). В связи с совершенствованием компьютерных технологий происходит дальнейшее усложнение численных моделей, их автоматизация, web-визуализация. Происходит интеграция математических моделей, данных натурных наблюдений, геоинформационных систем (ГИС) и данных дистанционного зондирования [79, 93, 125].

Целью данной работы является обзор и анализ существующих подходов к математическому моделированию процессов рассеяния примесей в атмосфере. Для реализации данной цели были сформулированы

следующие задачи: выявление классификационных критериев для формирования классификаций математических моделей; анализ существующих подходов к математическому моделированию, в том числе с применением классификационных критериев.

Значительная часть существующих подходов в математическом моделировании процессов рассеивания примеси в атмосфере являются модификациями и усовершенствованиями ряда базовых моделей. Все известные модели можно классифицировать по ряду критериев:

- по точке проецирования исследования;
- по типу загрязняющих веществ, для которых рекомендуется использовать математическую модель;
- по способу определения положение и перемещения точки;
- по используемым исходным данным (классификация А.Ю. Щербакова);
- по основным процессам рассеивания.

По точке проецирования исследования модели делятся:

1) Рецепторная модель. В рамках рецепторных моделей полученные эмпирическим путем концентрации в заданной точке оцениваются на предмет вклада различных источников в формирование полученных значений. Примером может служить модель LAND USE REGRESSION (LUR) (более ранее название модели Regression mapping (регрессионная картография)), которая строит поля концентраций поллютантов на основании данных о загрязнении воздуха (полученных экспериментальным путем) и данных различных слоев ГИС (характеристика автотранспортной сети, тип землепользования, топологические переменные). Данный подход используется в Европе и США с 1993 г. и позволяет получать оценку загрязнения атмосферного воздуха для больших по площади территорий с высокой степенью разрешения (до 15 м). Учет ограниченного числа предикторов (2-4) является фактором, значительно снижающим себестоимость и трудоемкость процедуры математического моделирования. На основании полученных значений в дальнейшем проводится идентификация источников загрязнения, получение количественных характеристик источников загрязнения атмосферного воздуха. Недостатком использования моделей LUR является отсутствие единой методики в выборе предикторов и погрешности, возникающие в связи с ретроспективным подходом [3, 73, 123].

2) Модели источника. В качестве основных данных, используемых в моделях источника, являются данные об объемах эмиссии поллютантов и условий их рассеивания. В рамках данной модели формируется результирующее поле загрязнения, часто используемое в дальнейшем при формализации ограничений значений выбросов по максимальному заданному значению уровня загрязнения атмосферного воздуха региона. Исходя из специфики источников поступления загрязняющих веществ в атмосферу, выделяют модели для стационарных [66] и передвижных [13] источников.

3) Гибридная модель. При сочетании принципов рецепторной модели и модели источника формируются гибридные модели [123].

По продолжительности функционирования и локализации источника выбросов модели делятся:

1. Математические модели для мгновенных точечных источников (аварийный разовый выброс). Примером может служить модель, используемая в методике «ТОКСИ-3» [110].

2. Математические модели для непрерывных точечных источников (стационарные источники загрязнения, функционирующие на постоянной основе в штатном режиме). Как правило, к такому типу относятся модели «факела», основанные на предположении о непрерывно действующем источнике. Факельные модели описывают поля концентраций газовых выбросов как функцию метеорологических параметров. При этом, факельные модели могут описывать атмосферный перенос в условиях сложного рельефа, когда допустимо приближение ламинарного обтекания ветровыми потоками пологих орографических элементов. Факельная модель легла в основу ОНД-86 и ее усовершенствованной версии МРР-2017 [66]. Аналогичные модели, используемые за рубежом [44, 149], модель МАГАТЭ [107].

3. Математические модели, для источников мгновенных, распределенных в пространстве (площадной или линейный источник, когда на разных участках происходит разовое поступление ЗВ в атмосферу в результате аварийной ситуации) [94].

4. Математические модели, для источников непрерывно распределенных, но действующих с постоянной мощностью в каждой точке пространства (автодорога с постоянным транспортным потоком). Примером может служить, разработанная модель локальных конвекций (МОЛОКО). В данной модели используется допущение, что механизм динамики воздушных потоков вдоль автомагистрали во многом аналогичен циркуляциям атмосферного воздуха во время пожара (в основу положен учет локальных конвективных потоков) [86]. В действительности каждый распределенный в пространстве и времени источник можно представить, как сумму элементарных источников, действующих в малых объемах пространства и в короткие промежутки времени. В этом случае, итоговое уравнение можно получить интегрированием фундаментального решения уравнения диффузии примеси по соответствующему объему и времени [154].

5. Математические модели, для источников, распределенных по пространству и во времени по определенному закону (автодорога с переменным транспортным потоком [66], дегазация свалочных газов, определяемая характером физико-химических процессов, происходящих как в теле свалки, так и в окружающей среде).

По типу загрязняющих веществ, для которых рекомендуется использовать математическую модель:

1. Модели, используемые для аэрозолей [17, 46, 59];

2. Модели, используемые для газообразных веществ [11, 57];

3. Гибридные модели [66].

По способу определения положение и перемещения точки, модели делятся:

1) Эйлеровы модели, в которых система координат определена относительно земной поверхности;

2) Лагранжевы модели отслеживают процессы в движущихся массах воздуха [123].

По используемым исходным данным (классификация А.Ю. Щербакова) [114]:

1. Эмпирико-статистические модели, основанные на анализе данных натуральных наблюдений за загрязнением атмосферы. Часто используется регрессионный анализ, на основании которого получаются ряд регрессионных уравнений, связывающих анализируемый параметр загрязнения с другими параметрами через эмпирические коэффициенты. Недостатком такого подхода является то, что точность и устойчивость используемых коэффициентов не всегда высоки [54, 64, 97, 157].

2. Аналоговые модели – осуществляют исследование структуры загрязнения атмосферного воздуха города в лабораторных условиях (аэродинамических трубах). Это позволяет получить ряд практических и теоретических результатов, но при этом, возникают сложности с адаптацией полученных результатов к реальным условиям [20].

3. Энергетические модели – анализируются эмпирические поля концентраций примесей в зависимости от синоптических процессов в период наблюдений, распределения источников загрязнения и параметров подстилающей поверхности. Подобные исследования активно проводились в конце XX в. в СССР и за рубежом, однако для такого рода моделей необходимо большое количество фактического материала [7, 8, 12, 54, 88, 97, 126, 131, 148].

4. Физико-математические модели позволяют объяснять количественные и качественные закономерности анализируемых процессов и давать прогноз загрязнения атмосферного загрязнения города с теоретической точки зрения. В общем виде, используя при формировании физико-математической модели загрязнения атмосферы фундаментальные законы сохранения (массы, энергии, количества движения) и интерпретируя их к условиям атмосферы (в уравнения неразрывности, притока тепла и движения, состояния и переноса примеси), используя при выводе уравнений условие баланса, можно получить замкнутую систему дифференциальных уравнений, в которых ранее введенные параметры атмосферы будут рассматриваться как функции координат и времени. Хотя большая часть моделей применяется в условиях идеализированного города, существуют успешные попытки моделирования условий переноса примесей в конкретных городах [20, 118, 142, 162].

По механизмам рассеяния, взятым за основу:

1. Статические модели - учитывает обобщенные региональные характеристики загрязнения воздушной среды. О.Г. Сеттон развивал подход использования «логарифмического нормального закона» в апроксимативной оценке эмпирических распределений [96]. Плотность распределения вероятности выражалась следующим образом (1):

$$F(c) = \frac{1}{ac\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\ln^2(c/b)}{2a^2}\right) \quad (1)$$

где  $c$  – концентрация примеси;

$a$ ,  $b$  – параметры, определяемые по эмпирическим данным [20, 95]. Еще одним примером статичного подхода в моделировании является стационарная Гауссова модель. Гауссовы модели, в соответствии с которыми, распределение концентраций характеризуется как гауссово в горизонтальном и вертикальном направлениях стали применяться с 1936 г. Они являются наиболее часто используемыми при вычислении концентраций загрязняющих веществ [123]. В общем случае, все гауссовы модели рассеяния примесей основаны на принципе сохранения масс для каждого вида загрязняющих веществ (ЗВ). Гауссовым законом описывается распределение примеси вблизи точечного источника в разных направлениях. При этом, концентрация в заданной точке с координатами  $(x, y, z)$ , формируемая выбросами источника, расположенного начале координат, пропорциональна произведению вероятностей распределения  $p_x, p_y, p_z$  (2):

$$p_x * p_y * p_z = \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} * \frac{1}{\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} * \frac{1}{\sigma_z\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}} \quad (2)$$

где  $\sigma_y^2$  – дисперсия распределения примеси в направлении  $y$ ;  $\sigma_x^2$  – дисперсия распределения примеси в направлении  $x$ ;  $\sigma_z^2$  – дисперсия распределения примеси в направлении  $z$  [20, 25, 47]. Таким образом, концентрация зависит от вертикальной и горизонтальной дисперсии координат частиц примеси. Различные подходы в оценке данных величин в значительной степени повлияли на формирование разнообразных гауссовых моделей. Наиболее распространенными являются метод Пасквила-Гриффода (основан на 6 классах устойчивости атмосферы), метод, основанный на учете вертикального градиента температуры в атмосфере, метод, учитывающий флуктуацию ветра, метод «разделенной сигмы» [39]. При этом, в данных подходах используются следующие допущения: направление ветра совпадает с осью  $x$ , начало координат лежит в основании источника, ЗВ отражаются от поверхности. Такие гауссовы модели широко используются в ГИС, рекомендованы МАГАТЕ (International Atomic Energy Agency) [141]. В тоже время, в связи с высокой динамичностью атмосферы, такие модели объективно отражают ситуацию только для небольших по площади территорий (рекомендуется использовать для расстояний не более 10 км). При некоторой доработке (учете зависимости концентраций ЗВ от времени присутствия примесей в атмосфере) такие модели можно использовать для больших расстояний (до 120 км) [58]

Кроме гауссового статистического подхода, для отдельных компонентов загрязнений используются методы множественной линейной регрессии. При этом, учитывается степень влияния фактора (определяемого коэффициентом) на процесс переноса примеси. Если  $c$  – это концентрация определенного уровня, а  $\delta, \varphi, \dots$  и

т.д. – это факторы, определяющие значение  $c$  и заданные в некоторых точках пространства и времени, то выражение для  $c$  может быть представлено в виде уравнения регрессии (3):

$$c = a_0 + \sum b_i \delta_i + \sum d_j \varphi_j + \dots \quad (3)$$

где  $\delta_i, \varphi_j$  – значение переменных  $i, j$ , по которым выполняется суммирование;

$a_0, b_i, d_j$  – числовые коэффициенты регрессии, подлежащие определению методом наименьших квадратов (математическим методом, основанным на минимизации суммы квадратов отклонений некоторых функций от экспериментальных входных данных) [95, 98].

2. Модели на основе аналитического решения стационарного уравнения.

В некоторых прикладных задачах используют аналитические решения двухмерного стационарного уравнения турбулентной диффузии. При этом учитываются следующие факторы: степенные вертикальные профили ветра, коэффициент перемешивания, сухое осаждение примеси на подстилающую поверхность. Такой подход используется для решения задач установления функциональной зависимости концентрации от основных действующих факторов. Ограничением использования указанного типа моделей является применяемые значительные упрощения, стилизация реальных условий в атмосфере. [38].

3. Модели численных решений молекулярной и турбулентной диффузии.

Количественным показателем наличия поллютанта в атмосферном воздухе является концентрация  $C$  (отношение массы поллютанта  $dm$  к заданному объему  $dV$  (или  $C = dm / dV$ ). Таким образом, поток примеси  $A$  – это масса примеси  $dm$ , прошедшая через элементарную площадку  $dx dy$  за время  $dt$  (4):

$$dA = \frac{dm}{(dx, dy, dt)} \quad (4)$$

Если с одной стороны площадки концентрации примеси больше, чем с другой стороны, то в результате хаотичных молекулярных движений, в целом будет существовать поток примеси через площадку в сторону меньшей концентрации. При этом считается, что поток пропорционален перепаду значений концентраций примеси (5.5):

$$Ax = -D \frac{dc}{dx} \quad (5)$$

где  $D$  – это коэффициент молекулярной диффузии. Может быть выражен через среднюю скорость движения молекул газа среды и среднюю длину пробега молекул. Он зависит от типа примеси, температуры среды, давления и прочих факторов.

Если считать, что поток изотропен во всех направлениях, то формула может быть представлена (5.6):

$$A = -D \nabla C \quad (6)$$

где  $\nabla$  – знак градиента.

К сожалению, атмосферный воздух не характеризуется изотропностью (постоянностью физических величин), поэтому правильнее реализовывать уравнение атмосферной диффузии с применением адвективных членов (учитывающих изменчивость физических свойств окружающей среды). Учет изменчивости параметров среды можно произвести при помощи уравнения турбулентной диффузии примеси. В турбулентном типе движения среды скорость течения испытывает хаотичные флуктуации, создаваемые существующими в потоке многочисленными вихрями различных размеров. В каждый момент времени в каждой точке концентрация примеси определяется совокупным влиянием турбулентных вихрей. В тоже время, разовые точечные значения концентраций не обладают большой информационной репрезентативностью. Больше внимание необходимо уделять сведениям об осредненных полях концентраций и статистической характеристике флуктуирующего поля  $c(x, y, z, t)$ . При этом, в связи с невозможностью использовать детерминированный подход к значениям таких параметров атмосферного воздуха как скорость в уравнении для турбулентного потока, уравнение диффузии необходимо усреднить с применением правил осреднения Рейнгольда. Метод осреднения Рейнгольда заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осредненных и пульсационных составляющих. Поскольку турбулентные потоки являются неизвестными величинами, то уравнение турбулентной диффузии является незамкнутым. Для выражения неизвестных величин через искомую функцию концентрации, используют коэффициенты турбулентности. Для определения коэффициентов турбулентности, допуская предположение, что турбулентные потоки пропорциональны градиенту средней концентрации примеси. Для одномерного случая выражения такого типа были предложены Дж. Тэйлором в 1915 г. [156] и В. Шмидтом в 1917 г. [155].

Аналогичный подход можно использовать и при решении уравнений для трехмерного пространства. При этом, на вертикальную турбулентную диффузию и, соответственно, на значения коэффициентов вертикальной диффузии должна существенно влиять плоскостная стратификация атмосферы. В устойчиво стратифицированной среде, вертикальные турбулентные пульсации должны быть «угнетены», так как перенос частиц в этом случае требует значительных затрат энергии. Демпфирующее влияние (подавляющее турбулентные вихри) устойчивого градиента плотности среды может привести к тому, что турбулентность в вертикальном направлении не разовьется. Критерием наличия турбулентности в среде, плотность которой дифференцирована по вертикали является градиентное (кинематическое) число  $Ri$  [165] (7):

$$Ri = \frac{g}{\rho_0} * \frac{dp/dz}{(du/dz)^2 + (dv/dz)^2} \quad (7)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\rho$  – плотность среды,  
 $\rho_0$  – плотность внешнего слоя среды;  
 $u$  – скорость движения.

Так, для горизонтального движения с устойчивым вертикальным градиентом, должно выполняться условие  $Ri \geq 1$  [18]. При росте стратификации атмосферного воздуха будет возрастать влияние неровностей подстилающей поверхности. Эмпирическим путем получено, что в большей части случаев турбулентный перенос на несколько порядков превосходит молекулярный перенос примеси. Поэтому часто в полуэмпирических упрощенных вариантах турбулентной диффузии опускают члены с молекулярной диффузией. Теории турбулентной диффузии, использующие такой подход, получили название К-теории [135].

В настоящее время к наиболее распространенным на практике моделям относятся [20, 30, 103, 115, 143, 152, 159]. Так, например, Лагранжева модель определяет перенос загрязняющих веществ по траекториям движения одиночных частиц под воздействием ветра и турбулентности. В рамках данной модели рассматривается бесконечно малая частица в фиксированный момент времени с координатами  $x, y, z$ . Перемещаясь за данной частицей, в последующие моменты ее координаты принимаются как функции начальных координат. Таким образом, скорости частиц – это производные от координат и времени. В дальнейшем траектории частиц усредняются по флуктуациям среды. Если рассматривать примесь, поступившую от источника как ансамбль дискретных клубов и частиц (со своими траекториями, изменяющимися в пространстве и времени), то для каждого клуба можно рассчитать траекторию движения, диффузионный перенос (при помощи стохастических моделей, при чем часто турбулентная структура принимается гауссовой). Таким образом, совокупность вкладов от каждого лагранжевого элемента формирует концентрацию примеси в заданной точке [14, 51]. Подход Лагранжа является продуктивным и используется для оценки турбулентного обмена. В тоже время, данный подход является очень трудоемким и нецелесообразен при использовании для больших территорий. Так же существуют сложности при учете химической трансформации.

Эйлерова модель опирается на уравнение «конвекции-диффузии», которое интегрируется на конечно-разностной эйлеровой сетке. Эйлерово представление турбулентности задает поле случайных величин в пространстве и времени через систему усредненных уравнений (например, на базе уравнений гидродинамики) [70, 109]. При этом, аргументом являются совокупность координат точек пространства. Функциями этих координат и времени являются компоненты вектора скорости, концентрации примеси в данной точке. Эйлерова модель атмосферной диффузии хорошо подходит к решению задач мезомасштабного переноса и химической трансформации, требует меньшего объема эмпирических данных. Но в связи с использованием относительно грубой сетки (шаг сетки может достигать нескольких километров по горизонтали) сложно адекватно представить концентрационные градиенты от точечных источников. [30]. В настоящее время существует большое количество эйлеровых моделей переноса 3В в атмосфере [2, 13, 16, 18, 23, 27, 28, 59, 76, 92, 109]. В тоже время, значительная часть такого типа моделей подходит только для территорий протяженностью несколько десятков км [16, 18]. Есть модели,

которые подходят только для низких холодных выбросов [18]. В некоторых моделях влияние подстилающей поверхности определяется через эмпирические данные о региональных характеристиках скоростей ветра [16]. Влияние подстилающей поверхности может и вовсе не учитываться [18, 91].

Часто методы Лагранжа и Эйлера используются совместно, для решения различных задач в описании турбулентности [30, 43, 70, 109, 127, 132, 159], где на начальном этапе распространения выброса используется дисперсионно-стохастический подход Лагранжа, в последующем периоде – Эйлера модель атмосферной диффузии. Такой подход оправдан при мезомасштабном подходе.

#### 4. Уравнения гидротермодинамики атмосферы

Уравнения гидродинамики основываются на законах сохранения импульса, массы, первого начала термодинамики и представляют собой замкнутую систему для определения вектора скорости движения, вектора угловой скорости вращения Земли, плотность среды, потенциальной температуры. Исследование вопросов корректности математических моделей гидротермодинамики атмосферы началось с работ Г.В. Демидова [40], в дальнейшем эти работы получили развитие под руководством В.В. Пененко и В.Ф. Рапута [83]. В.И. Сухоносом доказана разрешимость и единственность решения нелинейных уравнений гидродинамики атмосферы [101]. В работах В.В. Пененко и М.Г. Короткова представлены уравнения гидродинамики атмосферы и переноса поллютантов в атмосфере промышленных регионов (на примере Томска) [84].

Уравнения Навье-Стокса относятся к наиболее значимым уравнениям в гидродинамике, однако для

получения приемлемой точности результата необходимо применять такую расчётную сетку, ячейки которой меньше самого мелкого вихря [103].

Учет химического преобразования примеси в математических моделях зачастую осуществляется посредством включения в формулу переменной, зависящей от химической активности веществ [129, 161]. Повышение точности результата так же достигается посредством гибридизации моделей.

В таблице 1 / table 1 представлены модели рассеяния примесей, которые используются для учета процессов рассеивания примеси в мире.

Все существующие модели рассеивания примеси в атмосфере по рекомендуемому применению можно разделить на 3 группы:

1) Расчеты, проводимые на локальном уровне при постоянном во времени источнике [6, 13, 44, 59, 66, 86, 115].

2) Расчеты, проводимые на локальном и региональном уровне, направленные на определение последствий залповых выбросов (аварийных ситуаций) [110, 115].

3) Расчеты, проводимые на региональном уровне и направленные на оценку дальнего и трансграничного переноса примеси от источников [102, 111, 151].

На современном этапе развития, совершенствование ПК, развитие ГИС и Web-картографии послужило новым толчком в расширении применения методов математического моделирования. Примеры программных комплексов, в автоматическом режиме моделирующих процесс переноса примеси в атмосферном воздухе представлены в таблице 2 // table 2.

Таблица 1

## Обзор основных работ по моделированию загрязнения атмосферы

Table 1

## Review of the main works on atmospheric pollution modeling

Год // Year	Авторы публикаций // Authors of publications	Содержание используемой модели, ее достоинства и недостатки // Content of the model used, its advantages and disadvantages	Рекомендуемое применение // Recommended application	Тип модели (согласно ряду предл. класс. критериев) // Type of model (according to a number of proposed classification criteria)	Практическое прим. и верификация // Practical application and verification
1971	Лэмб Р.Г., Найбург М. [137]	В модели нанесенных твердых частиц Лагранжа центр масс участков выбросов отслеживается во время перемещения при локальной скорости ветра, в то время как диффузия вокруг этого центра масс моделируется дополнительным случайным перемещением, соответствующим скорости атмосферной диффузии.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, Гауссова модель рассеяния в сочетании с моделью ветрового переноса.	Информация о проводимой верификации отсутствует.
1982	Берлянт М.Е. [6, 59]	Математическая модель, разработана на основе гауссова рассеяния. Учитывает отражение от подстилающей поверхности и диффузное расширение факела по горизонтали и вертикали.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, Гауссова модель рассеяния.	Для проведения расчетов, носящих нормативный характер, подобная методика была рекомендована Агентством по охране окружающей среды США (EPA-US) [44].
1992	Гаврилов А.С. [115]	Гидротермодинамическая модель А.С. Гаврилова (ГДМ+МК) основана на построении пограничного слоя с учетом коэффициента турбулентности. При этом используется метод Монте-Карло. При этом учитываются процессы ветрового переноса, турбулентной диффузии, гравитационного оседания частиц примеси, вымывания их осадками, взаимодействия с подстилающей поверхностью (обтекание и параметризация зданий).	Рекомендуется для оценки рассеяния примеси в результате мгновенного и продолжительного выбросов, предназначена для оценки предельно допустимых концентраций. Рекомендуется для оценки рассеяния ЗВ в условиях городско застройки.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, метод Монте-Карло.	На базе данной модели создан программный комплекс «Zone» [115].
1994	Едигаров А.С., Сулейманов В.А. [42]	Физико-математические модели процессов звукового и дозвукового истечения сжимаемого газа и последующего струйно-диффузионного рассеивания основаны на численном интегрировании одномерных и двумерных уравнений сохранения массы, импульса и энергии.	Рекомендуется для определения последствий аварийных выбросов.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния.	Верификация проводилась посредством тестирования численных алгоритмов в сравнении с экспериментальными данными (результаты не приведены).
2000	Белов И.В., Беспалов М.С., Клочкова Л.В., Кулешов А.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. [13]	Математическая модель, разработанная для расчета поля ветра в урбанизированной местности – URBAN, развитая на основе транспортно-диффузионной модели.	Рекомендуется для оценки рассеяния ЗВ в условиях городско застройки.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния в сочетании с уточненной моделью ветрового поля в условиях застройки.	Результаты расчетов для экспериментальной площадки представлены графически.
2000	Муратова Г.В., Крукиер Л.А., Дацок В.Н., Дацок О.В., Чикин А.Л., Зубов В.Н. [74]	В качестве математической модели исследуемых процессов рассматривается транспортно-диффузионное уравнение распространения примесей в ветровом поле над местностью со сложным рельефом. Создаваемая модель состоит из двух частей, одна из которых описывает динамику атмосферы, а вторая – непосредственное распределение концентраций примесей при уже определенном поле скоростей. Для определения поля скоростей движения воздушных потоков в зависимости от рельефа была рассмотрена модель «URBAN».	Рекомендуется для оценки возможного рассеяния примеси на локальном уровне.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, Гауссова модель рассеяния в сочетании с моделью ветрового переноса.	Апробирована для района Волго-Донской АЭС.

Год // Year	Авторы публикаций // Authors of publications	Содержание используемой модели, ее достоинства и недостатки // Content of the model used, its advantages and disadvantages	Рекомендуемое применение // Recommended application	Тип модели (согласно ряду предл. класс. критериев) // Type of model (according to a number of proposed classification criteria)	Практическое прим. и верификация // Practical application and verification
2000	Шварц Г.К., Шкляев В.А. [111]	Представлена квазидвумерная модель, описывающая процессы переноса и диффузии примеси в свободной атмосфере, полученная с помощью усреднения поперек слоя трехмерных уравнений гидротермодинамики атмосферы и переноса примеси.	Рекомендуется для проведения мезомасштабных исследований оценки возможного рассеяния примеси.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, Модель Гауссова рассеяния в сочетании с моделью ветрового переноса.	Полученные концентрации хорошо согласуются с данными наблюдения на станциях фонового мониторинга для европейской части России (приведены примеры).
2001	Гевлич И.Г. [35]	Дифференциальное уравнение, описывающее конвективное и турбулентное движения в атмосфере и их влияние на рассеяние атмосферной примеси. Математическая схема теории градиентного переноса заимствована из физики тепло- и электропроводности.	Рекомендуется для проведения краткосрочных локальных расчетов рассеяния ЗВ в условиях городской застройки.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель градиентного переноса.	Сравнение экспериментальных исследований с натурными замерами показывает достаточную достоверность (данные не приведены).
2001	Тургумбаева Р.Х. [106]	Эмпирическая модель Паскуилла-Гиффорда, основанная на предположении постоянного точечного источника определенной мощности без помех от земной поверхности и гомогенности характеристик атмосферной дисперсии. В ее основе лежит представление концентрации примеси, выбрасываемой непрерывным точечным источником, в атмосфере, как струи с гауссовыми распределениями по вертикали и в поперечном к ветру направлении.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния.	Апробирована для Жамбылского региона Республики Казахстан.
2002	Швыряев А.А., Меньшиков В.В. [112]	Расчет среднегодовых концентраций сводится к интегрированию всех возможных концентраций загрязняющих веществ в заданной точке пространства (х,у), которые могут возникнуть в течение года с учетом вероятности реализации определенного из шести характерных классов устойчивости атмосферы при заданной скорости ветра и предполагается, что в пределах сектора М-румбовой розы ветров направление ветра распределено равномерно.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель Гауссова рассеяния.	Положена в основу практического пособия оценки риска от систематического загрязнения региона. Приведен пример расчета для г. Усть-Каменогорска.
2003	Бесчастнов С.П. [21]	Решение основана на результатах численного моделирования рассеяния примеси с помощью модели на основе метода Монте-Карло. Модели этого типа учитывают пространственно-временную неоднородность поля ветра и турбулентную диффузию в предположении нормального закона распределения пульсаций компонентов скорости ветра. Исходными для них являются уравнения движения Лагранжа.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, метод Монте-Карло в сочетании с моделью ветрового переноса.	Результаты расчетов проверены по данным станций Багуми и Кривой Рог (данные не приведены).
2003	Пекунов В.В., Ясинский Ф.Н. [80]	Модель состоит из кинетической (дифференциальные уравнения первого порядка) и динамической (уравнения Навье-Стокса для трех компонентов вектора скорости газа, уравнение распространения тепла, уравнение слабой сжимаемости газа, уравнения диффузии (с учетом скорости витания) газообразных веществ, уравнения для трех компонентов вектора скорости пыли, уравнение неразрывности для пыли, уравнение модели турбулентности Абрамовича-Секундова) подсистем.	Рекомендуется для оценки возможного рассеяния примеси на локальном уровне.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, сочетание модели Гаусса и Навье-Стокса.	Проведена проверка с натурными измерениями для перекрестка улиц г. Лондона, в окрестности предприятия British Steel.
2004	Шаталов А.А., Лисанов М.В., Печеркин А.С., Пчельников А.В., Сумской С.И. [110]	Приведенная модель (методика ТОКСИ-3) описывает следующие процессы: движение облака при переменной по высоте скорости ветра; гравитационное растекание; рассеяние облака в вертикальном направлении за счет атмосферной турбулентности (подмешивание воздуха в облако), а также в горизонтальном – за счет подмешивания воздуха в облако (атмосферная турбулентность, гравитационное растекание); вовлечение в облако паров воды из атмосферы; нагрев или охлаждение облака из-за подмешивания воздуха; теплообмен облака с подстилающей поверхностью.	Рекомендуется для определения последствий аварийных выбросов.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель ветрового переноса, в сочетании с гауссовым рассеянием и учетом гравитационного растекания.	Была проверена верификация по ряду экспериментальных данных, также проведено сравнение с другими методиками и моделями. Результаты представлены графически.

Год // Year	Авторы публикаций // Authors of publications	Содержание используемой модели, ее достоинства и недостатки // Content of the model used, its advantages and disadvantages	Рекомендуемое применение // Recommended application	Тип модели (согласно ряду предл. класс. критериев) // Type of model (according to a number of proposed classification criteria)	Практическое прим. и верификация // Practical application and verification
2006	Редикульцева Н.И. [86]	При разработке «Модели локальных конвекций» (МОЛОКО) в качестве основного принято предположение, что явление образования локальных атмосферных циркуляций целиком и полностью обусловлено силами Архимеда, действующими на воздушные объемы, плотность которых отличается от плотностей окружающей среды. В модели МОЛОКО рассматривается распространение загрязнений от одиночной автомагистрали в условиях плоской симметрии. Система уравнений модели включает уравнения Навье-Стокса для несжимаемых газов и уравнения переноса для энтальпии и загрязнения. Предполагается, что механизм динамики воздушных потоков вдоль автомагистрали во многом аналогичен циркуляциям атмосферного воздуха во время пожара (в основу положен учет локальных конвективных потоков).	Рекомендуется для оценки загрязнения атмосферного воздуха выбросами автомагистрали.	Модель передвижного источника, система координат Эйлера, метод Навье Стокса.	Проведена верификация модели на примере территорий лесных массивов, расположенных вблизи автомагистралей Национального парка «Лосиный остров» Московской области. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование влияния локальных атмосферных циркуляций на загрязнение выбросами автотранспорта.
2007	Юдин М.С. [117]	Перенос температуры реализуется полу-лагранжевым методом, а расчет адвекции примесей осуществляется с помощью простой модели случайных блужданий частиц. Сочетание полу-лагранжева метода с методом лагранжевой диффузии.	Рекомендуется для оценки возможного рассеяния примеси на локальном уровне.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа, метод Монте-Карло.	Информация о проводимой верификации отсутствует.
2009	Габдуллин В.М., Семакина А.В., Шкляев М.Е. [34]	Для характеристики среднегодового загрязнения использовалась модель распределения средних значений концентраций загрязняющих веществ по слою перемешивания Петрухина-Вишенского, в которой учитывались данные о выбросах этих веществ, скорости и повторяемости ветров различных направлений, продолжительности присутствия отдельных примесей в атмосфере.	Рекомендуется для проведения региональных исследований.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель градиентного переноса с учетом химической активности.	Проведена сверка с натурными данными, представлена в табличном виде. Расчет проводился для территории Удмуртской Республики.
2009	Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Типпов С.В. [100]	Представлено новое решение уравнения турбулентной диффузии, которое учитывает взаимодействие коэффициента турбулентной диффузии и скорости ветра в направлении осей декартовой системы координат. Основано на модели Эйлера.	Рекомендуется для определения влияния источников, на расстоянии не более 20 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, сочетание моделей ветрового переноса и гауссова распределения.	Информация о проводимой верификации отсутствует.
2010	Галерко Н.Н., Гарагер Е.К., Кузьменко Г.Г. [102]	Лагранже-Эйлерова диффузионная модель переноса радиоактивной примеси в атмосфере «LEDI» учитывает следующую входную информацию: метеопараметры, характеристики источника, неоднородность подстилающей поверхности. Вычисление горизонтальной траектории частицы – на основе системы координат Лагранжа. Вертикальное и поперечное рассеяния – опирается на процессы турбулентной диффузии. Источник моделируется в виде последовательности клубов.	Рекомендуется для расчета переноса примесей на расстоянии до 1000 км от газозольного точечного источника.	Модель стационарного источника, система координат Лагранжа и Эйлера, сочетание модели Гауссова рассеяния и метода Монте-Карло.	Модель протестирована на основе данных экспериментальных замеров для зоны Чернобыльского отчуждения.
2017	Берлянд М.Е. [66]	Методика МРР-2017 (разработанная на базе ОНД-86), использует способ задания профиля коэффициента турбулентности в виде «модели излома», то есть учитываются коэффициенты стратификации и расчеты приземных концентраций проводятся для наихудших условий, как для отдельного вещества, так и с учетом групп суммации. Учитываются параметры выброса. В тоже время, данная методика не учитывает дальние источники, устойчивость атмосферы учитывается в весьма обобщенной форме. Не применима для оценки максимально возможной наземной концентрации примеси при наихудших условиях рассеяния.	Рекомендуется для оценки максимально возможной концентрации ЗВ при неблагоприятных метеоусловиях, для территорий с удаленностью от источника не более 100 км.	Модель стационарного источника, система координат Эйлера, модель градиентного переноса.	Рекомендована для проведения нормативных расчетов на территории РФ. На базе методики МРР-2017 разработаны программные комплексы «Чистый воздух – расчет рассеяния» [9]; «Гарант-Универсал», [75]; программный комплекс «Призма», [90], программа «Эфир-6» [65].

Таблица 2

## Программные комплексы для оценки рассеяния примеси в атмосферном воздухе

Table 2

## Software packages for assessing the dispersion of impurities in atmospheric air

№	Название	Разработчики	Комментарии
1	Программный комплекс «VITECON» [26]	Южно-российский государственный технический университет, Новочеркасск, Россия	Может быть использован для сезонных долгосрочных прогнозов загрязнения
2	BUO-FMI [124]	Finnish Metrological Institute, Air Quality Research	Реализация гауссовой модели и градиентной К-модели (одномерная модель)
3	GASTER Dense Gas Dispersion Model [120]	Cambridge Environmental Research Consultants Ltd.	Моделирование эволюции облака при его рассеивании (одномерная модель)
4	DETRACT [158]	Environmental Research Laboratory, Institute of Nuclear Technology and Radiation Protection. National Centre for Scientific Research DEMOKRITOS Athens Greece	Двухмерная модель приземного слоя
5	United Kingdom Photo*chemical Trajectory Model [133]	United Kingdom Metrological Office University of Leeds NETCEN	Двухслойная траекторная модель
6	TNO – Isaksen model [140]	TNO Institute of Environmental Science, Energy Research and Process Innovation	Модификационная двухмерная модель Isaksen и Rodhe 1978 г.
7	PolluMap [145]	METEOTEST Fabrikstr. 14CH-3012 Bern Switzerland	Двухмерная эмпирическая модель для оценки загрязнения атмосферного воздуха
8	Tropos Verson D [166]	UK Meteorological Office Global Two-dimensional Chemistry Model	Двухмерная Эйлерова модель для химических источников
9	AIPOC [147]	Laboratory of Aerodynamics Department of Mechanical Engineering National Technical University of Athens (NTUA)	Статистическая модель, описывающая временное изменение концентрации примеси (боксовая стохастическая модель)
10	AEROPOL [136]	Tartu Oservatory, Aruka Ltd.	Гауссова модель, опирающаяся на классификацию Пэскуила
11	ISC3ST [163]	EPA-US (U.S. Environmental Protection Agency), USA	Основана на статистической гауссовой модели. Приняты следующие допущения: скорость ветра постоянна по горизонтали и вертикали, коэффициент диффузии не зависит от местоположения, примеси отражаются от поверхности, но не осаждаются, используется стратификация по Пэскуилу–Гиффорду (6 классов). Подходит для расчета в приземном слое для расстояний до 100 м.
12	PLUME [144]	Institute of Geophysics, Bulgarian Academy of Sciences	Гауссова модель факела от источника
13	SPRAY [157]	ENEL-SRI-Area Ambiente	Стохастическая Лагранжева модель распространения примеси
14	«Эколог» [36]	«Интеграл», Россия	Нормативная методика от подстилающей поверхности, влияние МРР-2017. Учета неоднородностей вертикальных профилей скорости ветра нет. Не подходит для больших территорий (более 100 км).
15	ЭПК «Zone» [116]	ЛЕНЭКОСОФТ	Математическая модель основана на сочетании трехмерной гидродинамической модели атмосферного пограничного слоя и методе Монте-Карло.
16	LED [146]	National Institute of Meteorology and Hydrology Bulgarian Academy of Sciences	Объединенная модель Лагранжевого факела с Эйлеровым рассеянием примеси
17	Модель прогнозирования состояния городской воздушной среды с применением нейронной сети [87]	Южный федеральный университет (г. Ростов-на-Дону), ФБГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (Рязань)	В качестве входных переменных выбраны скорость ветра (U, м/с), направление ветра (W, град.), температура воздуха (T, °C), концентрация загрязнителя, рассчитанная по программе УПРЗА «Эколог» (Ср, мг/м³). Нейронная сеть обучалась по данным мониторинга атмосферного воздуха г. Таганрога. Моделирование было проведено только в условиях ясной погоды, так как измерения концентраций загрязнителей при наличии осадков не производились. Получена прогностическая модель распределения загрязнителей в атмосферном воздухе при учете различных метеорологических условий и вклада промышленных предприятий в загрязнение воздушного бассейна города.
18	CALPUFF [128]	Sigma Research Corporation (SRC), California Air Resources Board	Многослойная нестационарная Лагранжа–Гауссова модель распространения загрязняющих веществ, которая имитирует влияние метеорологических условий, изменяющихся во времени и пространстве, на перенос, трансформацию и удаление поллютантов из атмосферы. Данная модель учитывает следующие переменные: орография, учет специфики прибрежных районов, изменение уровня воды, изменение влажности воздуха, химические преобразования ЗВ. При расчете текущих концентраций, учитывает данные о концентрациях ЗВ за предыдущие несколько часов.

№	Название	Разработчики	Комментарии
19	AERMOD [10]	The American Meteorological Society, U.S. Environmental Protection Agency	Система моделирования атмосферного рассеяния включает три модуля: стационарная модель рассеивания, разработанная для рассеивания выбросов атмосферы на небольшие расстояния (до 50 км); модуль собирающий и систематизирующий данные об характере атмосферных процессов (характеристики турбулентности, высота слоя перемешивания, поверхностный тепловой поток), модуль учитывающий влияние рельефа и поведение шлейфа загрязнения воздуха. Является одним из наиболее широко используемых инструментов моделирования рассеивания в воздухе загрязняющих веществ от промышленных источников. На основе AERMOD оценивается риск для здоровья. Комплекс содержит микрометеорологическую модель, основанную: а) на наблюдениях с местных метеорологических станций; б) альбедо, параметре Боуэна (описывает процесс теплопередачи от влажной поверхности) и шероховатости поверхности; в) данных о вертикальном профиле атмосферы, полученных с ближайшего радиозонда.
20	HIWAY2 [150]	U.S. Environmental Protection Agency	При оценке концентраций загрязняющих веществ для шоссе с «нормальным» уровнем выбросов выбросы с шоссе считаются эквивалентными ряду линейных источников с конечным значением. Каждая полоса движения моделируется так, как если бы это был прямой, непрерывный, конечный линейный источник с равномерным уровнем выбросов.
21	ADMS5 [119]	Environmental Tectonics Corporation (USA)	Модель рассеивания воздуха в шлейфе Гаусса нового поколения. ADMS5 учитывает следующие факторы модели: сухое и влажное осаждение; химический состав NO <sub>x</sub> ; воздействие холмов, различной шероховатости, зданий и береговых линий; турбулентность; изменяющиеся во времени источники и включение фоновых концентраций.
22	Система «ЭкоГИС» [113]	ООО Предприятие «ЛиДа инж.»	Нормативная методика МРР-2017

**Выводы.** Опираясь на имеющийся опыт применения математических моделей при прогнозировании процессов переноса примеси в атмосферном воздухе, можно сформулировать следующие выводы:

- Использование моделей на основе аналитического решения уравнения диффузии и гауссовых моделей допустимо только для небольших по площади территорий. Применение такого рода моделей при мезомасштабном подходе требует их доработки (одной стороны – аппроксимации, с другой стороны – внесения дополнительных коэффициентов, учитывающих дифференциацию физико-химических свойств атмосферы на больших по площади территориях).

- В процессе прогноза распространения примеси в атмосферном воздухе при использовании наиболее распространенных моделей значительную сложность представляет получение информации, базирующейся на специальных экспериментальных исследованиях и входящей в математическую модель: распределение пространственного турбулентного поля скорости ветра, температурной стратификации и влагосодержания в исследуемой области. Использование более сложных математических моделей может позволит снизить потребность в использовании результатов натурных измерений.

- Главными факторами в процессе переноса примеси являются направление и скорость ветра. Снижению уровня загрязнения атмосферного воздуха способствует: усиление ветра при неустойчивой стратификации, выпадение осадков [20, 99]. На приземное поле ветра значительное влияние оказывают циркуляционные процессы, а также физико-географические условия (особенности подстилающей поверхности, в том числе рельеф, наличие водоема).

- В рамках характеристики состояния атмосферного воздуха больших по площади территорий при по-

мощи методов математического моделирования, рекомендуются модели градиентного переноса с учетом химической активности веществ, адаптированные для определения процессов переноса примесей над разными по площади территориями. В целях проведения региональных исследований влияния выбросов от стационарных источников на состояние атмосферного воздуха, достаточно эффективной может быть методика, предложенная В.А. Петрухиным и В.А. Вишенским. Преимуществом данной модели перед моделями аналогичного рода, предназначенными для региональных исследований, является упрощенный вид учета параметров источника (в качестве источника загрязнения можно рассматривать населенные пункты). В тоже время наряду с упрощенным учетом характеристик источников выброса, можно отметить попытку оценить химическую активность примесей (введение показателя продолжительности присутствия их в атмосфере) и учет метеопараметров переноса примеси в атмосфере (высота слоя перемешивания, скорость и направление ветра в слое перемешивания). Простота расчета позволяет оценить влияние выбросов на состояние атмосферного воздуха в заданной точке множества источников на значительном удалении (до 1000 км) [151]. Для оценки процессов рассеяния на небольших по площади территориях будет применяться методика, реализованная в «Методах расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [66], утвержденная Приказом Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

#### Список источников

1. Аверин Г.В., Павлий В.А. Алгоритмы моделирования полей загрязнения атмосферы над промышленным городом по экспериментальным данным // Вестник Донецкого университета. Серия естественные науки. 2007. № 2. С. 338-346.

2. Алоян А.Е. Численное моделирование дальнего переноса примесей в атмосфере // Численные методы в задачах физики атмосферы и охраны окружающей среды. Новосибирск, 1985. С. 59-72.
3. Антропов К.М., Казмер Ю.И., Вараксин А.Н. Описание пространственного распределения загрязнения атмосферного воздуха промышленного центра методом LAND USE REGRESSION (обзор) // Экологические системы и приборы. № 1. 2010. С. 28-41.
4. Аргучинцев В.К. Численное моделирование распространения аэрозолей в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосферы и океана, 1994. Т.7, № 8. С. 1106-1111.
5. Ариель Н.З., Егоров Б.Н., Мурашева А.В. О характеристиках профиля ветра в нижнем слое воздуха над океаном. // Тр. ГГО. 1987. Вып. 506. С. 183-191.
6. Атмосферная диффузия и загрязнение воздуха. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 129 с.
7. Ахметжанов Х.А., Дегтярев В.И. Об оценке факторов, формирующих микроклимат Алма-Аты. Метеорология и гидрология, № 1, 1979. С. 66-71.
8. Ахметов М.С. Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы в районах размещения предприятий угольной промышленности // Методы изучения, расчетов и прогнозов водных и климатических ресурсов. Пермь, 1978. С. 111-126.
9. Бакин Р.И., Зарянов А.В., Киселев А.А., Красноперов С.Н., Меркушов В.П., Припачкин Д.А., Шведов А.М., Шикин А.В. Концепция разработки расчётно-прогностического комплекса RELTRAN для анализа безопасности при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу // Вопросы радиационной безопасности, 2018. № 3(91). С. 27-38.
10. Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Стальная М.В., Фаминская М.В. Данные космических наблюдений параметров поверхности в модели рассеяния промышленных загрязнений воздуха AERMOD. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 97-111. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-2-97-111>
11. Барт А.А., Беликов Д.А., Страченко А.В. Математическая модель для прогноза качества воздуха в городе с использованием суперкомпьютеров // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. № 3(15). 2011. С.15-24.
12. Бахарева Г.И. Гербурт-Гейбович А.А. Первые результаты мезометеорологических наблюдений в Москве и ближайших пригородах // Труды ЦВГМО. 1978. Вып. 12. С. 59-67.
13. Белов И.В., Беспалов М.С., Клочкова Л.В., Кулешов А.А., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Транспортная модель распространения газообразных примесей в атмосфере города // Математическое моделирование. 2000. Т. 12. № 11. С. 56-82.
14. Белов П.Н., Карлова З.Л. Траекторная модель переноса зарядов // Метеорология и гидрология. 1990. № 12. С. 67-74
15. Белолипецкий В.М., Шокин Ю.И. Математическое моделирование в задачах окружающей среды. Новосибирск: «ИНФОЛИО-пресс», 1997. 240 с.
16. Беляев И.И., Хрущ В.К. Математическая модель нестационарного пространственного переноса загрязнения в атмосфере // Известия ВУЗов. Энергетика. 1993. № 11-12. С. 134-141.
17. Береснев С.А., Грязин В.И. Вертикальный ветровой перенос аэрозолей в стратосфере // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 6. С. 537-543.
18. Берлянд М.Е. Генрихович Е.Л., Оникул В.И. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха из низких и холодных источников // Метеорология и гидрология. 1990. № 5. С. 5-17.
19. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование состояния атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
20. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 448 с.
21. Бесчастнов С.П. Влияние сдвигов ветра на поперечное рассеяние струи газоаэрозольной примеси на больших расстояниях от источника // Метеорология и гидрология. 2003. № 12. С. 39-45.
22. Борзилов В.А. Клепикова Н.В. и др. Метеорологические условия дальнего переноса радиоактивных продуктов аварии на Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1989. № 11. С. 5-11.
23. Борзилов В.А., Велтищева Н.С., Клепикова Н.В., Новицкий М.А., Бурков А.И., Метелкина Л.М. Региональная модель переноса полидисперсной примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1988. № 4. С. 57-65.
24. Бородулин А.И. Майстренко Г.М., Чалдин Б.М. Статистическое описание распространения аэрозолей в атмосфере. Новосибирск: НГУ, 1992. 124 с.
25. Бриль А.И., Другаченок М.А., Кабашников В.П. и др. Исследования рассеивания соляной пыли в Солигорском промышленном районе // Метеорология и гидрология. 1998. № 12. С. 64-71.
26. Бузало Н.С. Математическое моделирование переноса примеси в мезометеорологическом пограничном слое атмосферы: дис. канд. техн. наук: 05.13.18. Новочеркасск, 2003. 174 с.
27. Бузало Н.С. Численное моделирование распространения загрязняющей примеси в атмосфере // Научно-техническое творчество молодых – возрождению университета: Тез. докл. науч.-техн. конф. Студентов и аспирантов ЮРГТУ. Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. С. 30-31.
28. Бузало Н.С., Никифоров А.Н. Результаты численного исследования загрязнения г.Новочеркаска диоксидом азота и бен(а)пиреном // Интеллектуальный резерв университета – решению проблем Северо-Кавказского региона: Материалы 48-й сессии науч.-техн. конф. студ. и асп. ЮРГТУ (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 1999. С. 29-30.
29. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 262 с.
30. Бусингер Дж.А., Теннекес Х., Вингаард Дж.К. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 351 с.
31. Велтищева Н.С. Моделирование трансграничного переноса двуокиси серы с учетом вертикальных движений // Метеорология и гидрология, 1980. № 7. С. 12-19.

32. *Владимиров С.А.* Численное моделирование распространения пассивной примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1999. № 7. С. 22-35.
33. *Воронина П.В., Климова Е.Г., Куликов А.И., Медведев С.Б., Ивин Г.С., Фомин В.М.* Региональная схема математического моделирования процессов в атмосфере для проведения экологических экспертиз // Вычислительные технологии. 1994. Т.3. № 8. С. 27-44.
34. *Габдуллин В.М., Семакина А.В., Шкляев М.Е.* Моделирование распределения примесей в атмосфере (на примере Удмуртской Республики) // Вестник Удмуртского Университета. Биология. Науки о Земле. 2009. Вып. 1. С. 117-126.
35. *Гевлич И.Г.* Численное моделирование переноса газообразных выбросов на основе методологии искусственного интеллекта // Штучний інтелект. 2001. № 4. С. 13-17.
36. ГК «Интеграл». URL: <https://integral.ru> (дата обращения 31.07.2023).
37. *Григорьев Ю.Н., Шокин Ю.И.* Статистические модели и методы в задачах миграции аэрозолей // Вычислительные технологии. 1993. Т. 2. № 4. С. 117-140.
38. *Громов В.П., Горматюк Ю.К.* Рассеяние примеси от стационарных источников в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 1989. № 2. С. 37-47.
39. *Гусев Н.Г.* Радиоактивные выбросы в биосфере: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1986. С. 64-66.
40. *Демидов Г.В., Марчук Г.И.* Теорема существования решения задачи краткосрочного прогноза погоды // ДАН СССР. 1966. Т. 170. № 5. С. 1006-1008.
41. *Довгалоук Ю.А., Ивлев Л.С.* Физика водных и других атмосферных аэрозолей. СПб.: Изд. СПбГУ, 1998. 320 с.
42. *Едигаров А.С., Сулейманов В.А.* Математическое моделирование аварийного истечения и рассеивания природного газа при взрыве газопровода // Математическое моделирование, 1995. № 4. С. 23-45.
43. *Елохин А.П., Талерко Н.Н., Буйков М.В.* и др. Сравнение экспериментальных и расчетных данных приземной концентрации примеси в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 41-47.
44. Защита атмосферы от промышленного загрязнения. М.: Металлургия, 1988. 711 с.
45. *Зилитинкевич С.С.* Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 290 с.
46. *Иваницкий М.С.* Статистическое моделирование распределение концентраций твердых частиц в атмосфере района, сжигающей непроектное топливо // Известия ВУЗов. Энергетика. 2018. Т. 20. № 3-4. С. 129-135.
47. *Иванов А.П., Бриль А.И., Другачено М.А.* Математическое моделирование рассеяния примеси в воздушном бассейне промышленного региона. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных // Труды международной конференции «ENVIRONMENT 2000» «Измерение, моделирование и информационные системы как средства реабилитации окружающей среды на городском и региональном уровне». Издательство ЦНТИ, 2000. С. 156-162.
48. *Израэль Ю.А., Петров В.Н., Северов Д.А.* и др. Моделирование выпадения радиоактивных осадков в окрестности Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1987. № 2. С. 5-10.
49. *Катков В.Л.* Региональная модель переноса загрязнений // Доклады Первой международной конференции «Цифровая обработка информации и управления в чрезвычайной ситуации», Минск, 1998. Т. 2. С. 140-147.
50. *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеозидат, 1990. С. 463.
51. Кислотные дожди / под ред. Ю.А.Израэля. Л.: Гидрометеозидат, 1987. 276 с.
52. *Китайгородский С.А.* Физика взаимодействия атмосферы и океана. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 284 с.
53. *Кочергин В.П., Сухоруков В.А., Цветова Е.А.* Моделирование процессов вертикальной турбулентной диффузии в океане // Численные методы расчета океанических течений. Новосибирск: ВЦ Сиб. Отд. АН СССР, 1974. С.129-153.
54. *Кратцер П.А.* Климат города. М.: Иностранная литература, 1958. 236 с.
55. *Лайхтман Д.Л.* Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеозидат, 1970. 290 с.
56. *Левин А.В.* К вопросу об уравнениях, описывающих турбулентную диффузию в атмосфере. // Тр. Укр.НИГМИ. 1971. Вып.103. С. 102-107.
57. *Ложкин В.Н.* Новый метод прогнозирования загрязнения воздуха в районе автомагистрали при горении торфа // Пожаровзрывобезопасность. 2017. № 6, Т. 26. С. 60-69.
- <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.06.60-69>
58. *Марквэд В., Иле П.* Зависимость выпадений диоксида серы и сульфатов на подстилающую поверхность от метеорологических условий, параметров выброса и расстояния до источника выброса Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы: итоги сотрудничества социалистических стран / ред. М.Е. Берлянд. Ленинград: Гидрометеозидат, 1988. 239 с.
59. *Марчук Г.И.* Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 319 с.
60. *Марчук Г.И., Алоян А.Е.* Глобальный перенос примеси в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 31. № 5. С. 597-606.
61. *Марчук Г.И., Кузин В.И., Скиба Ю.Н.* Проекционно-разностный метод расчета сопряженных функций для модели переноса тепла в системе атмосфера-океан-почва // Актуальные проблемы вычислительной и прикладной математики. Новосибирск: Наука, 1983. С. 149-154.
62. *Марчук Г.И., Пененко В.В., Алоян А.Е., Лазриев Г.Л.* Численное моделирование микроклимата города // Метеорология и гидрология. 1979. № 8. С. 5-15.
63. *Марчук Г.И., Ривин Г.С., Юдин М.С.* Численные эксперименты с балансовыми схемами // Изв. АН ССР. Физика Атмосферы и океана. 1973. Т. 9. № 11. С. 1186-1190.
64. Метеорология и атомная энергия: / под ред. Н.Л. Бызовой, К.П. Махонько. Л.: Гидрометеозидат, 1971. 648 с.
65. Методология системного экологического картографирования / отв. ред. В.В. Воробьев, В.А. Снытк. Иркутск: Издательство Института географии СО РАН, 2002. 194 с.

66. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273.
67. Монин А.С. О структуре пограничного слоя атмосферы. // Изв. АН СССР, ФАО. 1965. Т. 2. № 3, С. 252-265.
68. Монин А.С. Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы. // Тр. Геофиз. Инт-та АН СССР. 1954. № 24(151).
69. Монин А.С. Полуэмпирическая теория турбулентной диффузии // Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. 1956. № 33(160).
70. Монин А.С. Яглом А.М. Статическая гидромеханика. М.: Наука, 1965, С. 639.
71. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. С.320.
72. Монин А.С., Обухов А.М. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы // Тр. Геофиз. Инт-та АН СССР. 1954. № 24(151).
73. Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека. // Региональная публикация ВОЗ, Европейская серия. 2001. № 85. 316 с.
74. Муратова Г.В., Крукиер Л.А., Дацюк В.Н., Дацюк О.В., Чикин А.Л., Зубов В.Н. Моделирование процессов распространения примесей воздушной среде в районе объектов энергетики // Труды 15 научно-практической конференции Телематика, СПб., 2008. Т. 1, 536 с.
75. Научно-практический портал «Экология производства» (01.01.2007) URL: <https://www.ecoindustry.ru/magazine/archive/viewdoc/2007/1/872.html> (дата обращения 02.06.2023).
76. Никифоров А.Н., Бузало Н.С. Прогнозирование загрязнения воздушной среды промышленного центра на основе уравнения турбулентного переноса // Сб. науч. Тр. 4 Всерос. симпозиума «Математическое моделирование и компьютерные технологии». Кисловодск, 2000. Т. 2. Ч. 2. С. 5-7.
77. Обухов А.М. Турбулентность в температурно-неоднородной атмосфере. // Тр. Ин-та теор. Геофиз. АН СССР. 1946. Вып. 1. С. 95-115.
78. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 279 с.
79. Онлайн карта «Breezometer». URL: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york> (дата обращения 06.06.2023).
80. Пекунов В.В., Ясинский Ф.Н. Параллельное решение задачи численного моделирования распространения загрязнений в воздушном бассейне большого города в окрестности предприятия. М., 2003. 78 с.
81. Пенек В.В., Алюян А.Е. Модели и методы для задач окружающей среды. Новосибирск: Наука, 1985. 256 с.
82. Пененко В.В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 350 с.
83. Пененко В.В. Рапут В.Ф. О единственности решения задачи прогноза погоды в сфере // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т.10. № 8. С. 891-894.
84. Пененко В.В., Коротков М.Г. Математическое моделирование гидродинамики и загрязнения атмосферы городов и промышленных регионов // В Сб. «Математические проблемы экологии» СО РАН, Новосибирск.: ИМ СО РАН, 1994. С.81-96.
85. Переведенцев Ю.П., Салахова Р.Х. Введение в геоэкологию атмосферы. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2007. 112 с.
86. Пикус И.М., Бутусов О.Б. Моделирование загрязнения лесов в районе автомагистралей // материалы науч.- практ. конф. «Пути повышения качества обучения в ВУЗах и конкурентоспособности молодых специалистов на рынке труда», 24 июня 2008 г., Тверь, 2008. 114 с.
87. Плуготаренко Н.К., Варнавский А.Н. Применение нейронных сетей для построения модели прогнозирования состояния городской воздушной среды // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4(часть 2).
88. Расторгуева Г.В. Некоторые результаты экспериментальных исследований термического режима Запорожья. Труды ГГО. 1974. Вып.332., С. 24-29.
89. Ривин Г.С., Воронина П.В. Перенос аэрозоля в атмосфере: имитационные эксперименты // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 744-747.
90. Сайт НПП «Логус». URL: <http://www.logus.ru/catalog/info45.htm> (дата обращения 02.06.2023).
91. Самарская Е.В., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Построение математической модели распространения загрязнений в атмосфере // Математическое моделирование. 1997. Т. 9. № 11. С. 59-71
92. Седунов Ю.С., Борзилов В.А., Клепикова Н.В. и др. Физико-математическое моделирование переноса в атмосфере радиоактивных веществ в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидрология. 1989. № 9. С. 6-13.
93. Семакина А.В., Воронов И.А., Ренкез Г.Б., Коробейникова А.А. Данилов П.Я., Зуев А.М. Разработка интеллектуального геосервиса для мониторинга экологической обстановки // Формирование научного и кадрового потенциала развития Удмуртской Республики 8-10 ноября: сб. конф. Ижевск: Удмуртский университет, 2022. 645 с.
94. Семенчин Е.А., Кузякина М.В. Стохастические методы решения обратных задач в математической модели диффузии. М.: ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2012. 173 с.
95. Семченко Б.А., Белов П.Н. Метеорологические аспекты охраны природной среды. М.: Издательство МГУ, 1984. 96 с.
96. Сеттон О.Г. Микрометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1958. 352 с.
97. Смит К. Основы прикладной метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 424 с.
98. Сонькин Л.Р. Вопросы прогнозирования фоновое загрязнения атмосферы в городах // Труды ГГО. 1974. Вып. 314. С. 40-45.
99. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 224.

100. Степаненко С.Н., Волошин В.Г., Тупцов С.В. Новая формула оценки уровня загрязнения атмосферы промышленными выбросами // Український гідрометеорологічний журнал. 2009. № 4. С. 227-237.
101. Сухонос В.И. О дифференциальных свойствах обобщенного решения стационарной задачи динамики атмосферы // Динамика неоднородной жидкости. 1980. Вып.44. С. 106-120.
102. Талерко Н.Н., Гарагер Е.К., Кузьменко Г.Г. Программный комплекс для оценки и прогнозирования радиационной ситуации в Чернобыльской зоне отчуждения // Ядерная и радиационная безопасность. 2010. Вып. 3. С. 45-49.
103. Темам Р. Уравнения Навье–Стокса. Теория и численный анализ. 2-е изд. М.: Мир, 1981. 408 с.
104. Типовые характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте / под ред. Н.Л. Бызовой. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 69 с.
105. Турбулентность. Принципы и применения / под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. М.: Мир, 1980. 535 с.
106. Тургумбаева Р.Х. Оценка и прогнозирование загрязнения приземного слоя атмосферы выбросами химического предприятия. Казахский национальный педагогический университет им. Абая, 2001. 65 с.
107. Учет дисперсионных параметров атмосферы при выборе параметров для атомных электростанций // Серия изданий по безопасности. № 50-SG-S3. Вена: МАГАТЭ, 1982. 184 с.
108. Фролов А.В., Резник Л.А., Бондаренко С.М. Бузало Н.С. Научные подходы к созданию информационно-аналитической системы мониторинга и управления качеством воздушной среды региона // Изв.вузов Сев.-Кавк. регион. техн. науки. 2001. № 2. С.102-104.
109. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизм и теория. М.: Гос. Изд. физ.-мат лит., 1963. 451 с.
110. Шаталов А.А., Лисанов М.В., Печеркин А.С., Пчельников А.В., Сумской С.И. Методика расчета рассеяния аварийных выбросов, основанная на модели «тяжелого газа» // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 9. С. 46-52.
111. Шварц К.Г., Шкляев В.А. Моделирование процессов переноса примеси в свободной атмосфере с помощью квазитрехмерной модели // Метеорология и гидрология. 2000. № 8. С.44-54.
112. Швыряев А.А., Меньшиков В.В. Оценка риска от систематического загрязнения атмосферы в исследуемом регионе: Методические указания к задаче практикума. М: Изд-во Химический факультет Московского Университета, 2002. 41 с.
113. Штриплинг Л.О. Баженов В.В., Калинин Ю.В., Нижневясов О.В. Геоинформационная система мониторинга состояния атмосферного воздуха и контроля за выбросами загрязняющих веществ предприятиями // Омский научный вестник. 2010. № 1(94). С. 203-208.
114. Щербаков А.Ю. Модель нижнего слоя атмосферы и переноса примесей в воздушном бассейне города. // Изменение природных комплексов Нечерноземной зоны под воздействием хозяйственной деятельности человека. 1982. С. 134-154.
115. Экологический программный комплекс для персональной ЭВМ / под ред. А.С. Гаврилова. СПб.: «Гидрометеоздат», 1992. 83 с.
116. Экологический программный комплекс для управления качеством атмосферы городов и промышленных зон «Zone». URL: <http://lenecosoft2002.narod.ru/prod01.htm> (дата обращения 31.07.2023).
117. Юдин М.С. Распространение атмосферного фронта и примеси над изолированной орографией. Институт Вычислительной Математики и Математической Геофизики СО РАН, 2007. 68 с.
118. Ackerman T.P. A Model of the Effects of Aerosols on Urban Climates with Particular Applicatios to the Los Angeles Basin. J. Atm.Sci. 1977. Vol 34. № 3. С. 531-547.
119. ADMS5 – Industrial Air Pollution Modelling Software. URL: <https://www.environmental-expert.com/software/adms-5-industrial-air-pollution-modelling-software-18344> (дата обращения 29.08.2023).
120. Advanced software for modelling dense gas dispersion. URL: <https://www.cerc.co.uk/environmental-software/GASTAR-model.html> (дата обращения 31.07.2023).
121. Air Pollution Modelling and its Application XIII // S.-E. Gryning, E. Batcharova (ed.), Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York-Boston-dodrecht-London-Moscow, 2000. 530 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4153-0>
122. Albergel A., Martin D, Strauss B., Gross J.M. The Chernobyl accident: modeling of dispersion over Europe of the radioactive plume and comparison with air activity measurements // Atmospheric Environment. 1988. Vol. 22. pp.839-857.
123. Armistead G. Russell Mathematical modeling of the effect of emission sources on atmospheric pollutant concentrations // Camagie mellon university. 1988. 692 p.
124. Atmospheric Dispersion Modelling. URL: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/atmospheric-dispersion-modelling-group> (дата обращения 31.07.2023).
125. Austin J. Toward the four-dimensional assimilation of stratospheric chemical constituents // J. Geophysics. Res. 1992. Vol. 97. P. 62-75.
126. Bornstein R.D. Observations of Urban Heat Island Effects in New York City // J.App.Met. 1968. Vol.7. № 4. P. 575-582.
127. Brandt J, Chritensen J., Zlatev Z. Real time predictions of transport, dispersion and deposition from nuclear accidents // Environmental Manadgmetn and Helth. 1999. Vol. 10/4. P. 216-223.
128. CALPUFF URL: <https://www.enviro-ware.com/calpuff/> (дата обращения 29.08.2023).
129. Carlslaw D.C. Development of an urban inventory for road transport emission of NO2 and comparison with estimates derived from ambient measurements // Bevers Atmospheric Environment. 2005. Vol. 39. P. 2049-2059.
130. Chang J.S., Brost R.A., Isaksen I.S.A., Madronich S., Middleton P., Stockwell W.R., Walcek C.J. A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concept and formulation // J. Geophys. Res. 1987. Vol. 92. P. 18691-18699.

131. *Clarce I.F.* Nocturnal Urban Boundary Layer Over Cincinnati, Ohio // *Mon.Wea.Rev.* 1969. Vol. 97. № 8. P. 582-589.
132. *Eliaassen A.* A review of long-rang transport modeling // *J. Of Applied Meteorology.* 1982. Vol. 19. № 3. P. 92-115.
133. Enhancements to the UK Photochemical Trajectory Model for simulation of secondary inorganic aerosol // *Atmospheric Environment.* 57. P. 278-288.
134. *Henderson-Sellers B.* A simple formula for vertical eddy diffusion coefficients under condition of nonneutral stability // *Journal of Geophysical Research.* Vol. 87, 1982. P. 5860-5864.
135. *Howard L.M.* Note on a paper of John W Miles // *J. Fluid Mech.* 1961. Vol. 10. № 4. P. 509-512.
136. *Koostaja T.V.* Tartu Observatoorium Toraveres. 2014. 214p.
137. *Lamb R.G., Neiburger M.* An interim version of a generalized urban air pollution model // *Atmos. Environ.* 1971. P. 239-264.
138. Large scale computations in air pollution modeling // *Z. Zlatev et al. (ed.), Proceeding of the NATO Advanced research Workshop on Large Scale Computations in air Pollution Modelling, 6-10 July 1998 Sofia, Bulgaria.* Kluwer Academic Publishers, 1999. 392 p.
139. Long-range air pollution: from models to policies // *D. Syrakov, E. Batcharova, B. Wiman (ed.): Proceeding from the Swedish-Bulgarian Workshop, Sozopol, Bulgaria, 1997.* 277 p.
140. *Loon M., Bultjes P.J.H., Segers A.J.* Data assimilation of ozone in the atmospheric transport chemistry model LOTOS // *Environmental Modelling & Software.* 2000. 15. P. 603-609.
141. Mateial of IEAI Meeting, Chapter 3. 1987. 26 p.
142. *Mc Elroy I.L.* Numerical Study of Nocturnal Heat Island Over a Medium Sized Mid-Latitude City (Columbus, Ohio) Bound. – *Layer Met.* 1973. Vol. 3. P. 442-453.
143. *McNider R.T. Moran M.D., Pielke R.A.* Influence of diurnal and inertial boundary layer oscillations on long-rang dispersion // *Atmospheric Environment.* 1988. № 11. P. 2445-2462.
144. *Miloshev N.G.* Air pollution studies at the geophysical institute, Bulgarian academy of sciences // 6th International scientific conference SGEM 2006 Albena. P. 337-348.
145. *Mohammed A., Salim A.A., Hazem T., Zahraa A.H., Fadi A.* PolluMap: A Pollution Mapper for Cities // *Conference materials: Innovations in Information Technology, 2006.* URL: [https://www.researchgate.net/publication/224281084\\_PolluMap\\_A\\_Pollution\\_Mapper\\_for\\_Cities](https://www.researchgate.net/publication/224281084_PolluMap_A_Pollution_Mapper_for_Cities) (дата обращения 31.07.2023).
146. National Institute of Meteorology and Hydrology, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria. URL: [https://www.bodc.ac.uk/data/bodc\\_database/ctd/](https://www.bodc.ac.uk/data/bodc_database/ctd/) (дата обращения 31.07.2023).
147. National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Fluids Section. Laboratory of Aerodynamics. URL: [http://www.aerolab.mech.ntua.gr/environmental\\_and\\_industrial\\_experiments.html](http://www.aerolab.mech.ntua.gr/environmental_and_industrial_experiments.html) (дата обращения 31.07.2023).
148. *Oke T.R.* Review of Urban Climatology 1973-1976. WMO Tech/ Note № 169, 1979. 100 p.
149. *Pasquill F.* Atmospheric diffusion. The dispersion of wind born material from industrial and other sources. N.Y.: Wiley, 1974. 429 p.
150. *Peterson W.B.* User's Guide for HIWAY-2. A Highway Air Pollution Model. Research and Development. USA. 1980. 83 p.
151. *Petrukhin V.A., Vishensky V.A.* Modelling and evolution of Eurasian Tropospheric background pollution based on the data bank of multi-year measurements // *Changing composition of the troposphere. Spatial Environment. Rep. № 17. WMO.* 1989. P. 83-86.
152. *Phisic W.L.* LADM: Lagrangian Atmospheric Dispersion Model. CSIRO. Division of Atmospheric Research. 1994. Technical Paper №. 24. P. 121-145.
153. *Pielke R.A., Uliasz M.* Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models. Limitations and strengths. // *Atmospheric Environmental.* 1998. Vol. 32. № 8. P. 1255-1266.
154. *Risutova Z.* Analytical model of air pollution due to motor car traffic // *Contrib.Geophys.Inst.Slov.Acad.Sci.* 1991. № 11. P. 99-107.
155. *Schmidt W.* Der Massenaustausch bei der undgeordneten Stromung in freier Luft und seine Folgen. *Sitzungsber. Akad.Wiss.Wien, Math.-nat.K1 (2a) Bd.126.* 1917. № 6. P. 757-804.
156. *Taylor G.I.* Eddy motion in the atmosphere. *Phil. Trans. Roy. Soc. ser. A.* 1915. Vol. 215. P. 1-26.
157. *Tesler R.* Urban Meteorological Studies in Uppsals. Abs. Uppsala Dossertation Faculti Sci., 1981. 21 p.
158. The DETRACT atmospheric dispersion modeling system. URL: [https://atmosphericdispersion.fandom.com/wiki/National\\_Centre\\_of\\_Scientific\\_Research\\_%22DEMOKRITOS%22#The\\_DETRACT\\_atmospheric\\_dispersion\\_modeling\\_system](https://atmosphericdispersion.fandom.com/wiki/National_Centre_of_Scientific_Research_%22DEMOKRITOS%22#The_DETRACT_atmospheric_dispersion_modeling_system) (дата обращения 31.07.2023).
159. *Uliasz M.* The atmospheric mesoscale dispersion modeling system // *J. of Applied Meteorology.* 1993. Vol. 32. P. 139-149.
160. *Van Jaarsverld J.A., Van Pul W.A.J., De Leeuw F.* Modeling transport and deposition of persistent organic pollution in the European region // *Atmospheric Environmental.* 1997. Vol.32. P. 1011-1024.
161. *Venticatram A.* The Development and Application of a Simplified Ozone Modelling System (SONS) // *Atmospheric Environment.* 1999. Vol. 28. № 22. P. 3365-3678.
162. *Vukovich F.M., King W.I.* A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: Comparisons Between Observed Data and Simulation Result on the Urban Heat Island Circulation // *J.App.Met.* Vol. 19. № 7. 1980. P. 761-778.
163. WindRose PRO Help by Enviroware srl. URL: [https://www.enviroware.com/windrose/help/load\\_isc3st.shtml](https://www.enviroware.com/windrose/help/load_isc3st.shtml) (дата обращения 31.07.2023).
164. *Yokoyama O, Gamo M., Yamamoto S.* The vertical profiles of the turbulence quantities I the atmospheric boundary layer // *J. Met. Soc. Japan.* 1977. Vol. .55. № 3. P. 264-272.
165. *Yu-Ning H.* On the classical Bradshaw – Richardson number: Its generalized form, properties, and application in turbulence. 2018. Vol.30, Iss. 12.

166. Zhang R., Migxing W., Qingcun Z. Global Two-Dimensional Chemistry Model and Simulation of Atmospheric Chemical Composition // *Advances in Atmospheric Sciences*. 2012. Vol.17(1). P.72-82.

### References

- Averin, G. and Pavliy, V., 2007. Algoritmy modelirovaniya poley zagryazneniya atmosfery nad promyshlennym gorodom po eksperimental'nym dannym [Algorithms for modeling atmospheric pollution fields over an industrial city based on experimental data]. *estnik Donetskogo universiteta. Seriya yestestvennyye nauki*. (2), pp.338-346. (in Russian)
- Aloyan, A., 1985. Chislennoye modelirovaniye dal'nego perenosa primesey v atmosfere [Numerical modeling of long-range transport of impurities in the atmosphere]. *Chislennyye metody v zadachakh fiziki atmosfery i okhrany okruzhayushchey sredy*, pp. 59-72. (in Russian)
- Antropov, K., Kazmer, Yu., and Varaksin, N., 2010. Opisaniye prostranstvennogo raspredeleniya zagryazneniya atmosfernogo vozdukh promyshlennogo tsentra metodom LAND USE REGRESSION (obzor) [Description of the spatial distribution of atmospheric air pollution of an industrial center by the land-use regression method (review)]. *Ekologicheskiye sistemy i pribory*. (1), pp. 28-41. (in Russian)
- Arguchintsev, V., 1994. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniye aerorozley v pogranchnom sloye atmosfery [Numerical modeling of aerosol propagation in the boundary layer of the atmosphere]. *Optika atmosfery i okeana*, 7(8), pp. 1106-111. (in Russian)
- Ariel, N., Egorov, B. and Murasheva, A., 1987. O kharakteristikakh profilya vetra v nizhnem sloye vozdukh nad okeanom [On the characteristics of the wind profile in the lower layer of air above the ocean]. *Tr. GGO*, (506), pp. 183-191. (in Russian)
- Berlyant M. (ed.), 1982. *Atmosfernaya diffuziya i zagryazneniye vozdukh* [Atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad, Hydrometeoizdat. 129 p. (in Russian)
- Akhmetzhanov, H. and Degtyarev, V., 1979. Ob otsenke faktorov, formiruyushchikh mikroklimat Alma-Aty [On the assessment of factors forming the microclimate of Alma-Ata]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (1), pp. 66-71. (in Russian)
- Akhmetov, M., 1978. Meteorologicheskiye aspekty zagryazneniya atmosfery v rayonakh razmeshcheniya pred-priyatiy ugol'noy promyshlennosti [Meteorological aspects of atmospheric pollution in areas where coal industry enterprises are located.] *Metody izucheniya, raschetov i prognozov vodnykh i klimati-cheskikh resursov*. Pp. 111-126. (in Russian)
- Bakin, R., Zaryanov, A., Kiselev, A., Krasnoperov, S., Merkushev, P., Pripachkin, D., Shvedov, A. and Shikin, A., 2018. Concept of computational and predictive system reltran as applied to safety analyses in cases of atmospheric releases of radioactive substances. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, №3(91), pp. 27-38. (in Russian)
- Balter, B., Balter, D., Egorov, V., Stalnaya, M., Faminskaya, M., 2021. Space observations of surface parameters for aermod modeling of industrial air pollution. part 1. literature review, data, land use classification. *Cosmic Research*, 18(2), pp. 97-111.
- Bart, A., Belikov, D. and Strachenko, A., 2011. Supercomputer-based mathematical model for air quality prediction in the urban area. *Matematika i mekhanika*, 3(15), pp. 15-24. (in Russian)
- Bakhareva, G. and Herbut-Geibovich, A., 1978. Pervyye rezul'taty mezometeorologicheskikh nablyudeniy v Moskve i blizhayshikh prigorodakh [The first results of mesometeorological observations in Moscow and the nearest suburbs]. *Trudy TSVGMO*. 12, pp. 59-67. (in Russian)
- Belov, I., Bespalov, M., Klochkova, L., Kuleshov, A., Suzan, D. and Tishkin, V., 2000. Transportnaya model' rasprostraneniya gazoobraznykh primesey v atmosfere goroda [Transport model of the propagation of gaseous impurities in the city atmosphere]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. 12(11), pp. 56-82. (in Russian)
- Belov, P. and Karlova, Z., 1990. Trayektornaya model' perenosa zaryazneniy [Trajectory model of the transfer of contamination]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 12, pp. 67-74. (in Russian)
- Belolipetsky, V. and Shokin, Yu., 1997. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in environmental problems]. Novosibirsk: "INFOLIO-press". 240 p. (in Russian)
- Belyaev, I., and Khrushch, V., 1993. Matematicheskaya model' nestatsionarnogo prostranstvennogo perenosa zagryazneniya v atmosfere [Mathematical model of nonstationary spatial transport of pollution in the atmosphere]. *Izvestiya vuzov. Energy*. 11-12, pp. 134-141. (in Russian)
- Beresnev, S. and Grazin, V., 2007. Vertikal'nyy vetrovoy perenos aerorozley v stratosfere [Vertical airflow in the stratosphere]. *Optika atmosfery i okeana*, 20(6), pp. 537-543. (in Russian)
- Berlyand, M., Genrikhovich, E. and Onikul, V., 1990. Modelirovaniye zagryazneniya atmosfernogo vozdukh iz nizkikh i kholodnykh istochnikov [Modeling of atmospheric air pollution from low and cold sources]. *Meteorologiya i gidrologiya*, (5), pp. 5-17. (in Russian)
- Berlyand, M., 1985. *Prognoz i regulirovaniye sostoyaniya atmosfery* [Forecast and regulation of the state of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 272 p.
- Berlyand, M., 1975. *Sovremennyye problemy atmosfernoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 448 p. (in Russian)
- Beschastnov, S., 2003. Vliyaniye sdvigoov vetra na poperechnoye rasseyaniye strui gazoerazol'noy primesi na bol'shikh rassstoyaniyakh ot istochnika [The influence of wind shear on transverse scattering of a jet of aerosol impurity at large distances from the source]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (12), pp. 39-45. (in Russian)
- Borzilov, V., Klepikova, N. et al., 1989. Meteorologicheskiye usloviya dal'nego perenosa radioaktivnykh produktov avarii na Chernobyl'skoy atomnoy elektrostantsii [Meteorological conditions of long-range transport of radioactive products of the Chernobyl nuclear power plant accident]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (11), pp. 5-11. (in Russian)

23. Borzilov, V., Veltischeva, N., Klepikova, N., Novitsky, M., Burkov, A. and Metelkina, L., 1988. Regional'naya model' perenosa po-lidispersnoy primesi v atmosfere [Regional model of polydisperse impurity transfer in the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (4), pp. 57-65. (in Russian)
24. Borodulin, A., Maistrenko, G. and Chaldin, B., *Statisticheskoye opisaniye rasprostraneniya aerorozoley v atmosfere* [Statistical description of aerosol propagation in the atmosphere]. Novosibirsk, NSU. 124 p. (in Russian)
25. Bril, A., Drugachenok, M., Kabashnikov, V. et al., 1988. Issledovaniya rasseivaniya solyanoy pyli v Soligorskom promyshlennom rayone [Studies of salt dust dispersion in the Soligorsk industrial district]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (12), pp. 64-71. (in Russian)
26. Buzalo, N., 2003. *Matematicheskoye modelirovaniye perenosa primesi v mezometeorologicheskoy pogranichnom sloye atmosfery* [Mathematical modeling of impurity transfer in the mesometeorological boundary layer of the atmosphere]. Candidate's Dissertation of Technical Sciences. Novocheerkassk, 174 p.
27. Buzalo, N., 1999. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryaz-nyayushchey primesi v atmosfere* [Numerical modeling of the spread of a contaminant in the atmosphere]. In: *Scientific and Technical Creativity of the Young - to the Revival of the University: Proceedings of Scientific-Technical. Conf. Students and Postgraduates of South-Russian State Technical University. Novocheerkassk, South-Russian State Technical University*, pp. 30-31. (in Russian)
28. Buzalo, N. and Nikiforov, A., 1999. *Rezultaty chislennogo issledovaniya zagryazneniya g. Novocheerkasskka dioksidom azota i ben(a)pirenom* [Results of a numerical study of pollution of Novocheerkassk with nitrogen dioxide and ben(a)pyrene]. In: *The Intellectual reserve of the University – Solving the Problems of the North Caucasus region: Proceedings of the 48th Session of the Scientific and Technical Conf. Student. and Asp. of the South Russian State Technical University (NPI). Novocheerkassk, South Russian State Technical University*, pp. 29-30. (in Russian)
29. Byzova, N., Ivanov, V. and Garger, E., 1989. *Turbulentnost' v pogranichnom sloye atmosfery* [Turbulence in the boundary layer of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 262 p. (in Russian)
30. Businger, J., Tennekes, H., Wingaard, J., 1985. *Atmospheric turbulence and air pollution modelling (Dordrecht etc.)* Leningrad, Hydrometeoizdat. 351 p. (in Russian)
31. Veltischeva, N., 1980. Modelirovaniye transgranichnogo perenosa dnuoki-si sery s uchetom vertikal'nykh dvizheniy [Modeling of transboundary transport of sulfur dioxide taking into account vertical movements]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (7), pp. 12-19. (in Russian)
32. Vladimirov, S., 1999. Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya pas-sivnoy primesi v atmosfere [Numerical modeling of the propagation of passive impurities in the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (7), pp. 22-35. (in Russian)
33. Voronina, P., Klimova, E., Kulikov, A., Medvedev, S., Ivin G. and Fomin, V., 1994. Regional'naya skhema matematicheskogo modelirovaniya protsessov v atmosfere dlya prove-deniya ekologicheskikh ekspertiz [Regional scheme of mathematical modeling of processes in the atmosphere for environmental expertise]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*. 3(8), pp. 27-44. (in Russian)
34. Gabdullin, V., Semakina, A. and Shklyayev, M., 2009. Modelirovaniye raspredeleniya primesey v atmosfere (na primere Udmurtskoy Respubliki) [Modeling of the distribution of impurities in the atmosphere (on the example of the Udmurt Republic)]. *Bulletin of the Udmurt University. Biology. Earth Sciences*. (1), pp. 117-126. (in Russian)
35. Gevlich, I., 2001. Chislennoye modelirovaniye perenosa gazoobraznykh chistykh sredstv na osnove metodologii iskusstvennogo intellekta [Numerical modeling of the transfer of gaseous emissions based on the methodology of artificial intelligence]. *Shtuchnyy intellekt*. 4, pp. 13-17. (in Russian)
36. Integral Group of Companies. Available from: <https://integral.ru> [Accessed 31th July 2023].
37. Grigoriev, Yu. and Shokin, Yu., 1993. Statisticheskiye modeli i metody v zadachakh migra-tsii aerorozoley [Statistical models and methods in aerosol migration problems]. *Vychislitel'nyye tekhnologii*, 2(4), pp. 117-140. (in Russian)
38. Gromov, V. and Gormatyuk, Y., 1989. Rasseyaniye primesi ot statsionar-nykh istochnikov v prizemnom sloye atmosfery [Scattering of impurities from stationary sources in the surface layer of the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (2), pp. 37-47. (in Russian)
39. Gusev, N., 1986. *Radioaktivnyye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in the biosphere]. Moscow, Energoatomizdat, pp. 64-66. (in Russian)
40. Demidov, G. and Marchuk, G., 1966. Teorema sushchestvovaniya resheniya zadachi kratko-srochnogo prognoza pogody [The theorem of the existence of a solution to the problem of short-term weather forecast]. *DAN OF THE USSR*. 170(5), pp. 1006-1008. (in Russian)
41. Dovgalyuk, Yu. and Ivlev, L., 1988. *Fizika vodnykh i drugikh atmosferynykh aerorozoley* [Physics of water and other atmospheric aerosols]. St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg State University. 320 p. (in Russian)
42. Edigarov, A. and Suleymanov, V., 1995. Matematicheskoye modelirovaniye avariynogo istecheniya i rasseivaniya prirodnoy gaza pri vzryve gazoprovoda [Mathematical modeling of emergency outflow and dispersion of natural gas during a gas pipeline explosion]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. (4), pp. 23-45. (in Russian)
43. Elokhin, A., Talerko, N., Buikov, M. et al., 1996. Sravneniye eksperimental'nykh i raschetnykh dannykh prizemnoy kontsentratsii primesi v atmosfere [Comparison of experimental and calculated data on the surface concentration of impurities in the atmosphere]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (2), pp. 41-47. (in Russian)
44. Atkins, P., Bek, L., Blekvud, T., Boun, N., Bubenik, D., Vestberg, K., Gerstl, R., Grinfeld, S., Krokker, B., Leonardos, G., Lloyd, A., Nepp, K., Paylet, M., Roberts, D., Sparks, A., Toro, R., Khenz, D., Short, L., Eddinger, D., 1988. *Zashchita atmosfery ot promyshlennogo zagryazneniya* [Protection of the atmosphere from industrial pollution]. Moscow, Metallurgiya. 711 p. (in Russian)
45. Zilitinkevich, S., 1970. *Dinamika pogranichnogo sloya atmosfery* [Dynamics of the boundary layer of the

atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 290 p. (in Russian)

46. Ivanitskiy, M., 2018. Statistical modeling of distribution of concentration of solid particles in the atmosphere district location boiler, combusting non-project fuel. *Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems*, 20(3-4), pp.129-135. (in Russian)

47. Ivanov, A., Bril, A., Drugachenoe, M. et al., 2000. *Matematicheskoye modelirovaniye rasseyaniya primesi v vozdushnom bassejne promyshlennogo regiona. Sopostavleniye raschetnykh i eksperimental'nykh dannyykh [Mathematical modeling of impurity scattering in the air basin of an industrial region. Comparison of calculated and experimental data]. In: Measurement, Modeling and Information Systems as Means of Environmental Rehabilitation at the Urban and Regional Levels: Proceedings of the International Conference "ENVIROMIS 2000". Publishing House of the Central Research Institute, pp. 156-162. (in Russian)*

48. Israel, Yu., Petrov, V., Severov, D. et al., 1987. Modelirovaniye vypadeniya radioaktivnykh osadkov v okrestnosti Chernobyl'skoy AES [Simulation of radioactive fallout in the vicinity of the Chernobyl nuclear power plant]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (2), pp. 5-10. (in Russian)

49. Katkov, V., 1998. *Regional'naya model' perenosa zagryazneniy [Regional model of pollution transfer]. In: Digital Information Processing and Management in an Emergency Situation: Reports of the First International Conference, Minsk. 2, pp.140-147. (in Russian)*

50. Kachurin, L., 1990. *Fizicheskiye osnovy vozdeystviya na atmosfernyye protsessy [Physical bases of influence on atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, pp. 463. (in Russian)*

51. Israel Yu. (ed.), 1987. *Kislotty dozhdi [Acid rain]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 276 p. (in Russian)*

52. Kitaygorodsky, S., 1970. *Fizika vzaimodeystviya atmosfery i okeana [Physics of interaction between the atmosphere and the ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 284 p. (in Russian)*

53. Kochergin, V., Sukhorukov, V. and Tsvetova, E., 1974. Modelirovaniye protsessov vertikal'noy turbulentnoy diffuzii v okeane [Modeling of vertical turbulent diffusion processes in the ocean]. *Chislennyye metody rascheta okeanicheskikh techeniy*. Novosibirsk, Central Research Center of the Siberian Branch. USSR Academy of Sciences, pp. 129-153. (in Russian)

54. Kratzer, P., 1958. *Klimat goroda [The climate of the city]. Moscow, Inostrannaya literatura, 236 p. (in Russian)*

55. Laichtman, D., 1970. *Fizika pogranichnogo sloya atmosfery [Physics of the boundary layer of the atmosphere]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 290 p. (in Russian)*

56. Levin, A., 1971. K voprosu ob uravneniyakh, opisyyayushchikh turbulentnyuyu diffuziyu v atmosfere [On the question of equations describing turbulent diffusion in the atmosphere]. *Tr. Ukr.NIGMI*, (103), pp. 102-107. (in Russian)

57. Lozhkin, V., 2017. New approach for predicting of air pollution near highway caused by burning peat bog. *Pozharovzryvobezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 26(6), pp. 60-69. <https://doi.org/10.18322/PVB.2017.26.06.60-69> (in Russian)

58. Markvad, V. and Ile, P., 1988. Zavisimost' vypadeniy dioksida sery i sul'fatov na podstilayushchuyu povorkhnost' ot meteorologicheskikh usloviy, parametrov vybrosov i rasstoyaniya do istochnika vybrosov [Dependence of sulfur dioxide and sulfate precipitation on the underlying surface on meteorological conditions, emission parameters and distance to the source of emission]. *Meteorologicheskkiye aspekty zagryazneniya atmosfery: itogi sotrudnichestva sotsialisticheskikh stran*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 239 p. (in Russian)

59. Marchuk, G., 1982. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy [Mathematical modeling in the problem of the environment]. Moscow, Nauka, 319 p. (in Russian)*

60. Marchuk, G. and Aloyan, A., 1995. Global'nyy perenos primechi v atmosfere [Global transfer of matter in the atmosphere]. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*. 31(5), pp. 597-606. (in Russian)

61. Marchuk, G., Kuzin, V. and Skiba, Yu., 1983. Proyeksionno-raznostnyy metod rascheta sopryazhennykh funktsiy dlya modeli perenosa tepla v sisteme atmosfera-ocean-pochva [Projection-difference method for calculating conjugate functions for a model of heat transfer in the atmosphere-ocean-soil system]. *Aktual'nyye problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki*. Novosibirsk, Nauka, pp. 149-154. (in Russian)

62. Marchuk, G., Penenko, V., Aloyan, A. and Lazriev, G., 1979. Chislennoye modelirovaniye mikroklimata goroda [Numerical modeling of the microclimate of the city]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (8), pp. 5-15. (in Russian)

63. Marchuk, G., Rivin, G. and Yudin, M., 1973. Chislennyye eksperimenty s balansovymi skhemami [Numerical experiments with balance schemes]. *Izv. AN SSR. Physics of the Atmosphere and Ocean*. 9(11), pp.1186-1190. (in Russian)

64. Byzova N. and Makhonko, K. (ed.), 1971. *Meteorologiya i atomnaya energiya [Meteorology and atomic energy]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 648 p. (in Russian)*

65. Vorobyov V. and Snytko V. (ed.), 2002. *Metodologiya sistemnogo ekologicheskogo kartografirovaniya [Methodology of systematic ecological mapping]. Irkutsk, Publishing House of the Institute of Geography SB RAS, 194 p. (in Russian)*

66. Metody raschetov rassevaniya vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosferenom vozdukh [Methods of calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air]. Decree of Ministry of Natural Resources of Russia № 273 from 06.06.2017. (in Russian)

67. Monin, A., 1965. O strukture pogranichnogo sloya atmosfery [On the structure of the boundary layer of the atmosphere]. *Izvestiya AN SSSR, FAO*. 2(3), pp.252-265. (in Russian)

68. Monin, A. and Obukhov, A., 1954. Osnovnyye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloye atmosfery [The main patterns of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere]. *Tr.Geofiz. Int-ta AN SSSR*. 24(151). (in Russian)

69. Monin, A., 1956. Poluempiricheskaya teoriya turbulentnoy diffuzii [Semiempirical theory of turbulent diffusion]. *Tr. Geofiz. in-ta AN SSSR*. 33(160). (in Russian)

70. Monin, A. and Yaglom, A., 1965. *Sticheskaya gidromekhanika* [Static hydromechanics]. Moscow, Nauka, 639 p. (in Russian)
71. Monin, A. and Ozmidov, R., 1981. *Okeanskaya turbulentnost'* [Oceanic turbulence]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 320 p. (in Russian)
72. Monin, A. and Obukhov, A., 1954. Osnovnyye zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloye atmosfery [The main patterns of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere]. *Tr. Geofiz. Inta AN SSSR*. 24(151). (in Russian)
73. 2001. *Monitoring ambient air quality for health impact assessment*. WHO Regional Office for Europe, (85), 316 p. (in Russian)
74. Muratova, G., Krukier, L., Datsyuk, V., Datsyuk, O., Chikin, A. and Zubov, V., 2008. *Modelirovaniye protsessov rasprostraneniya primesey vozduшной srede v rayone ob'yektov energetiki* [Modeling of the processes of propagation of impurities in the air environment in the area of energy facilities]. In: *Telematics-2008: Proceedings of the 15th Scientific and Practical Conference, 2008, St. Petersburg. 1*, 536 p. (in Russian)
75. Scientific and practical portal "Ecology of production" (01.01.2007). Available from: <https://www.ecoindustry.ru/magazine/archive/viewdoc/2007/1/872.html> [Accessed 6th February 2023].
76. Nikiforov, A. and Buzalo, N., 2000. *Prognozirovaniye zagryazneniya vozduшной srede promyshlennogo tsentra na osnove uravneniya turbulentnogo perenosa* [Forecasting of air pollution of an industrial center on the basis of the equation of turbulent transport]. In: *Mathematical Modeling and Computer Technologies: Proceedings of 4th All-Russian Symposium, Kislovodsk, pp. 5-7*. (in Russian)
77. Obukhov, A., 1946. Turbulentnost' v neodnorodnoy po temperature atmosphere [Turbulence in a temperature-inhomogeneous atmosphere]. *Trudy In-ta ikh. geofiziki AN SSSR*. 1, pp.95-115. (in Russian)
78. Ozmidov, R., 1986. *Diffuziya primesey v okeane* [Diffusion of impurities in the ocean]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 279 p. (in Russian)
79. Online map "Breezometer" Available from: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york> [Accessed 6th June 2023].
80. Pekunov, V. and Yasinsky, F., 2003. *Parallelnoye resheniye zadachi vkluchayet issledovaniye rasprostraneniya zagryazneniy v vozdušnykh basseynakh bol'shogo goroda na territorii predpriyatiya* [Parallel solution of the problem of numerical modeling of pollution propagation in the air basin of a large city in the vicinity of an enterprise]. Moscow, 78p. (in Russian)
81. Peneko, V. and Aloyan, A., 1985. *Modeli i metody dlya resheniya zadach okruzhayushchey srede* [Models and methods for environmental issues]. Novosibirsk, Nauka, 256 p. (in Russian)
82. Penenko, V., 1981. *Metody chislennogo modelirovaniya atmosferykh protsessov* [Methods of numerical modeling of atmospheric processes]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 350 p. (in Russian)
83. Penenko, V. and Raput V., 1974. O yedinstvennosti resheniya zadachi prognoza pogody v sfere [On the uniqueness of solving the problem of weather forecasting in the sphere]. *Izv. AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. 10(8), pp. 891-894. (in Russian)
84. Penenko, V. and Korotkov, M., 1994. *Matematicheskoye modelirovaniye gidrodinamiki i zagryazneniya atmosfery gorodov i promyshlennykh regionov* [Mathematical modeling of hydrodynamics and atmospheric pollution of cities and industrial regions]. *Matematicheskiye problemy ekologii*. Novosibirsk, IM SO RAN, pp. 81-96. (in Russian)
85. Perevedentsev, Yu. and Salakhova, R., 2007. *Vvedeniye v geoekologiyu atmosfery: uchebnoye posobiye* [Introduction to the geoecology of the atmosphere]. Kazan, Kazan University Publishing House. 112 p. (in Russian)
86. Pikus, I. and Butusov, O., 2008. *Modeling forest pollution in the area of highways* [Modeling of forest pollution in the area of highways]. In: *Ways to Improve the Quality of Education in Universities and the Competitiveness of Young Professionals in the Labor Market: Proceedings of Science Practical Conference, 24 June 2008, Tver, 114p*. (in Russian)
87. Plugotarenko, N. and Varnavskiy, A., 2012. Application of neural networks to build prediction model of urban air pollution. *Engineering Journal of Don*, (4) (part 2).
88. Rastorgueva, G., 1974. Nekotoryye rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy termicheskogo rezhima Zaporozh'ya [Some results of experimental studies of the thermal regime of Zaporozhye]. *Trudy GGO*. (332), pp. 24-29. (in Russian)
89. Rivin, G. and Voronina, P., 1998. Perenos aerolya v atmosfere: imi-tatsionnyye eksperimenty [Aerosol transport in the atmosphere: simulation experiments]. *Optika atmosfery i okeana*. 11(7), pp. 744-747. (in Russian)
90. Website of NPP "Logus". Available from: <http://www.logus.ru/catalog/info45.htm> [Accessed 6th February 2023].
91. Samarskaya, E., Suzan, D. and Tishkin, V., 1997. *Postroyeniye matematicheskoy modeli rasprostraneniya zagryazneniy v atmosfere* [Construction of a mathematical model of pollution propagation in the atmosphere]. *Matematicheskoye modelirovaniye*. 9(11), pp. 59-71. (in Russian)
92. Sedunov, Yu., Borzilov, V., Klepikova, N. et. al., 1989. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye perenosa v atmosfere radioaktivnykh veshchestv v rezultate avarii na Chernobyl'skoy AES [Physical and mathematical modeling of atmospheric transport of radioactive substances as a result of the Chernobyl accident]. *Meteorologiya i Gidrologiya*. (9), pp.6-13. (in Russian)
93. Semakina, A., Voronov, I., Renkez, G., Korobeynikova, A. Danilov, P. and Zuev, A., 2022. *Razrabotka intellektual'nogo geoservisa dlya monitoringa ekologicheskoy obstanovki* [Development of an intelligent geoservice for monitoring the environmental situation]. In: *Formation of Scientific and Human Development Potential of the Udmurt Republic: Proceedings of Conf. 8-10 November 2022, Izhevsk, Udmurt University, 645p*. (in Russian)
94. Semenchin, E., Kuzyakina, M., 2012. *Stokhasticheskiye metody resheniya obratnykh zadach v matematicheskoy modeli diffuzii* [Stochastic methods for solving inverse problems in a mathematical model of diffusion]. Moscow, OOO Izdatel'skaya firma «Fiziko-matematicheskaya literatura». 173p. (in Russian)

95. Semchenko, B. and Belov, P., 1984. *Meteorological aspects of environmental protection* [Meteorological aspects of environmental protection]. Moscow, Publishing House of Moscow State University. 96p. (in Russian)
96. Sutton, O., 1958. *Micrometeorology*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 352 p. (in Russian)
97. Smith, K., 1978. *Principles of applied climatology*. Leningrad, Gidrometeoizdat. 424 p. (in Russian)
98. Sonkin, L., 1974. Voprosy prognozirovaniya fo-novogo zagryazneniya atmosfery v gorodakh [Issues of forecasting background atmospheric pollution in cities]. *Trudy GGO*. (314), pp. 40-45. (in Russian)
99. Sonkin, L., 1991. *Sinoptiko-statisticheskii analiz i kratkosrochnyy prognoz zagryazneniya atmosfery* [Synoptic and statistical analysis and short-term forecast of atmospheric pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 224 p. (in Russian)
100. Stepanenko, S., Voloshin, V. and Tipzov, S., 2009. New formula of estimation of level of the ground concentrations of pollutions from industrial sources. *Ukrains'kiy gidrometeorologichniy zhurnal*. (4), pp. 227-237. (in Russian)
101. Sukhonosov, V., 1980. O differentsial'nykh svoystvakh obobshchennogo resheniya statsionarnoy zadachi dinamiki atmosfery [On the differential properties of the generalized solution of the stationary problem of atmospheric dynamics]. *Dinamika neodnorodnoy zhidkosti*. Novosibirsk, (44), pp. 106-120. (in Russian)
102. Talerko, N., Garager, E., Kuzmenko, G., 2010. Programmnyy kompleks dlya otsenki i prognozirovaniya radiatsionnoy situatsii v Chernobyl'skoy zone otchuzhdeniya [A software package for assessing and predicting radiation radiation in the Chernobyl exclusion zone]. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. (3), pp. 45-49. (in Russian)
103. Temam, R., 1981. *Navier-Stokes equations*. Moscow, Mir. 408 p. (in Russian)
104. Byzova, N., 1982. *Tipovyye kharakteristiki nizhnego 300-metrovogo sloya atmosfery po izmereniyam na vy-sotnoy maste* [Typical characteristics of the lower 300-meter layer of the atmosphere according to measurements on a high-altitude mast]. Leningrad, Gidrometeoizdat. 69 p. (in Russian)
105. Frost W. and Moulden T. (ed.), 1980. *Handbook of Turbulence. Fundamentals and Applications*. Moscow, Mir. 535 p. (in Russian)
106. Turgumbaeva, R., 2001. *Otsenka i prognozirovaniye zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery vybrosami khimicheskogo predpriyatiya* [Assessment and forecasting of pollution of the surface layer of the atmosphere by emissions from a chemical enterprise]. Kazakhskiy natsional'nyy pedagogicheskii universitet im. Abaya. 65 p. (in Russian)
107. 1982. *Uchet dispersionnykh parametrov atmosfery pri vybore parametrov dlya atomnykh elektrostantsiy* [Consideration of atmospheric dispersion parameters when choosing parameters for nuclear power plants]. Seriya izdaniy po bezopasnosti № 50-SG-S3. Vienna: IAEA. 184 p. (in Russian)
108. Frolov, A., Reznik, L., Bondarenko, S. and Buzalo, N., 2001. Nauchnyye podkhody k sozdaniyu informatsionno-analiticheskoy sistemy monitoringa i upravleniya kachestvom vozduшной sredy regiona [Scientific approaches to the creation of an information and analytical system for monitoring and managing the quality of the air environment in the region]. *Izv.vuzov Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki*. (2), pp.102-104. (in Russian)
109. Hinze, J., 1963. *Turbulence. An introduction to its mechanism and theory*. Moscow, Fizmatgiz. 451 p. (in Russian)
110. Shatalov, A., Lisanov, M., Pecherkin, A., Pchelnikov, A. and Sumskey, S., 2004. Metodika rascheta rasseyaniya aviarynykh bol'nykh, osnovannaya na modeli «tyazhelogo gaza» [Method of calculating the dispersion of emergency emissions based on the "heavy gas" model]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. (9), pp. 46-52. (in Russian)
111. Shvarts K. and Shklyayev, V., 2000. Simulation of the processes of admixture propagation in the lower atmosphere, related to powerful ejections at abnormal heating. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 8, pp. 44-54. (in Russian)
112. Shvyryayev, A. and Menshikov, V., 2002. *Otsenka riska ot sistematicheskogo zagryazneniya atmosfery v predelakh ogranicheniy: Metodicheskiye ukazaniya po resheniyu prakticheskikh zadach* [Risk assessment from systematic atmospheric pollution in the studied region: Methodological guidelines for the task of the workshop]. Moscow, Izd-vo Fakul'tet Khimicheskogo Moskovskogo Universiteta. 41 p. (in Russian)
113. Shtripling, L., Bazhenov, V., Kalinin, Yu., Nizhevyasov, O., 2010. Geoinformation system for monitoring of condition of atmospheric air and control over emissions of polluting substances by enterprises. *Omsk Scientific Bulletin*, 1(94), pp. 203-208. (in Russian)
114. Shcherbakov, A., 1982. Model' nizhnego sloya atmosfery i perenos primesey v vozdušnyy basseyn goroda [Model of the lower layer of the atmosphere and the transport of impurities in the air basin of the city]. *Izmeneniye vykhoda kom-pleksov Nechernozemnoy zony pod vliyaniye khozyaystvennoy deyatel'nosti cheloveka*, pp. 134-154. (in Russian)
115. Gavrilov, A., Voronov, G. and Shcherbo, A., 1992. *Ecological software package for personal computer. theoretical basis and user manual of ecological package "zone"*. St. Petersburg, Gidrometeoizdat. 83 p. (in Russian)
116. Ecological software package for managing the quality of the atmosphere of cities and industrial zones "Zone". Available from: <http://lenecosoft2002.narod.ru/prod01.htm> [Accessed 31th July 2023].
117. Yudin, M., 2007. *Rasprostraneniye atmosfer'nogo fronta i primesi nad izolirovannoy orografiyey* [Propagation of the atmospheric front and impurities over isolated orography]. Institut vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy geofiziki SO RAN. 68p. (in Russian)
118. Ackerman, T., 1977. A Model of the Effects of Aerosols on Urban Climates with Particular Applications to the Los Angeles Basin. *J. Atm.Sci.*, 34(3), pp. 531-547.
119. ADMS5 – Industrial Air Pollution Modelling Software. Available from: <https://www.environmental-expert.com/software/adms-5-industrial-air-pollution-modelling-software-18344> [Accessed 29th August 2023].
120. Advanced software for modelling dense gas dispersion. Available from: <https://www.cerc.co.uk/environmental-software/GASTAR-model.html> (дата обращения 31.07.2023) [Accessed 31th July 2023].

121. Gryning S.-E. and Batcharova E. (ed.), 2000. *Air Pollution Modelling and its Application XIII*. New York, Springer New York. 530p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4153-0>
122. Albergel, A., Martin, D, Strauss, B. and Gross, J., 1988. The Chernobyl accident: modeling of dispersion over Europe of the radioactive plume and comparison with air activity measurements. *Atmospheric Environment*, 22, pp. 839-857.
123. Armistead, G., 1988. *Russell Mathematical modeling of the effect of emission sources on atmospheric pollutant concentrations*. Camagie mellon university. 692 p.
124. Atmospheric Dispersion Modelling. Available from: <https://en.ilmatieteenlaitos.fi/atmospheric-dispersion-modelling-group> [Accessed 31th July 2023].
125. Austin, J., 1922. Toward the four-dimensional assimilation of stratospheric chemical constituents. *J. Geophysics. Res.*, 97, pp. 62-75.
126. Bornstein, R., 1968. Observations of Urban Heat Island Effects in New York City. *J. App. Met.*, 7(4). pp. 575-582.
127. Brandt, J., Christensen, J. and Zlatev, Z., 1999. Real time predictions of transport, dispersion and deposition from nuclear accidents. *Environmetal Manadgmetn and Helth*, 10(4), pp. 216-223.
128. CALPUFF. Available from: <https://www.enviro-ware.com/calpuff/> [Accessed 29th August 2023].
129. Carlslaw, D., 2005. Development of an urban inventory for road transport emission of NO2 and comparison with estimates derived from ambient measurements. *Bevvers Atmospheric Environment*, 39, p. 2049-2059.
130. Chang, J., Brost, R., Isaksen, I., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W. and Walcek, C., 1987. A three-dimensional Eulerian acid deposition model: physical concept and formulation. *J. Geophys. Res.*, 92, pp. 18691-18699.
131. Clarke, I., 1969. Nocturnal Urban Boundary Layer Over Cincinnati, Ohio. *Mon. Wea. Rev.*, 97(8), pp. 582-589.
132. Eliaassen, A., 1982. Review of long-rang transport modeling. *J. Of Applied Meteorology*, 19(3), pp. 92-115.
133. Enhancements to the UK Photochemical Trajectory Model for simulation of secondary inorganic aerosol. *Atmospheric Environment*, 57, pp. 278-288.
134. Henderson-Sellers, B., 1982. A simple formula for vertical eddy diffusion coefficients under condition of nonneutral stability. *Journal of Geophysical Research*, (87), pp. 5860-5864.
135. Howard, L., Note on a paper of John W Miles. *J. Fluid Mech*, 10(4), p. 509-512.
136. Koostaja, T., 2014. *Tartu Observatoorium To-raveres*. 214p.
137. Lamb, R., and Neiburger, M., 1971. An interim version of a generalized urban air pollution model. *Atmos. Environ*, pp. 239-264
138. Zlatev Z. et al. (ed.), 1999. *Large scale computations in air pollution modelling*. Large Scale Computations in air Pollution Modelling: Proceeding of the NATO Advanced research Workshop, 6-10 July 1998, Sofia, Bulgaria. Kluwer Academic Publishers, p. 392
139. Syrakov, D., Batcharova, E. and Wiman, B., 1997. *Long-range air pollution: from models to policies*. Proceeding from the Swedish-Bulgarian Workshop, Sozopol, Bulgaria, 277 p.
140. Loon, M., Builtjes, P. and Segers, A., 2000. Data assimilation of ozone in the atmospheric transport chemistry model LOTOS. *Environmental Modelling & Software*, 15, pp. 603-609.
141. Mateial of IEAI Meeting, 1987, chapter 3, pp. 26.
142. Mc Elroy, I., 1973. Numerical Study of Nocturnal Heat Island Over a Medium Sized Mid-Latitude City (Columbus, Ohio) Bound. *Layer Met*, 3, pp. 442-453.
143. McNider, R., Moran, M., Pielke, R., 1988. Influence of diunal and inertial boundary layer oscillations on long-rabg dispersion. *Atmospheric Environment*, (11), pp. 2445-2462.
144. Miloshev, N., 2006. *Air pollution studies at the geophysical institute, Bulgarian academy of sciences*. In: *6th International Scientific Conference Sgem, 2006, Albena*, pp. 337-348.
145. Mohammed, A., Salim, A., Hazem, T., Zahraa, A., Fadi, A., 2006. PolluMap: A Pollution Mapper for Cities. In: *Innovations in Information Technology: Proceedings of Conference*. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/224281084\\_PolluMap\\_A\\_Pollution\\_Mapper\\_for\\_Cities](https://www.researchgate.net/publication/224281084_PolluMap_A_Pollution_Mapper_for_Cities) [Accessed 31th July 2023].
146. National Institute of Meteorology and Hydrology, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria. URL: [https://www.bodc.ac.uk/data/bodc\\_database/ctd/](https://www.bodc.ac.uk/data/bodc_database/ctd/) [Accessed 31th July 2023].
147. National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Fluids Section. Laboratory of Aerodynamics. Available from: [http://www.aerolab.mech.ntua.gr/environmental\\_and\\_industrial\\_experiments.html](http://www.aerolab.mech.ntua.gr/environmental_and_industrial_experiments.html) [Accessed 31th July 2023].
148. Oke, T., 1979. Review of Urban Climatology 1973-1976. *WMO Tech.*, (169), 100 p.
149. Pasquill, F., 1974. *Atmosheric diffusion. The dispersion of wind born material from industrial and other sources*. N.Y., Wiley.429 p.
150. Peterson, W., 1980. *User's Guide for HIWAY-2. A Highway Air Pollution Model*. USA, Research abd Development. 83 p.
151. Petrukhin, V. and Vishensky, V., 1989. Modelling and evolution of Eurasian Tropospheric background pollution based on the data bank of multi-year measurements. *Changing composition of the troposphere. Spatial Environment*, (17), pp. 83-86.
152. Phisic, W., 1994. LADM: Lagrangian Atmospheric Dispersion Model. CSIRO. Division of Atmspheric Research. *Technical Paper*, (24), pp. 121-145
153. Pielke, R. and Uliasz, M., 1998. Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models. Limitations and strengths. *Atmosheric Environmental*, 32(8), pp. 1255-1266.
154. Risutova, Z., 1991. Analytical model of air pollution due to motor car traffic. *Contrib. Geophys. Inst. Slov. Acad. Sci.*, (11), pp. 99-107.
155. Schmidt, W., 1917. Der Massenaustausch bei der undgeordneten Stromung in freier Luft und seine Folgen. *Sitzungsber. Akad. Wiss. Math.-nat*, K1(2a), 126(6), pp. 757-804.

156. Taylor, G., 1915. Eddy motion in the atmosphere. *Phil. Trans. Roy. Soc.*, ser. A, 215, pp. 1-26.
157. Tesler, R., 1981. Urban Meteorological Studies in Uppsals. *Abs. Uppsala Dossertation Faculti Sci.*, 21 p.
158. The DETRACT atmospheric dispersion modeling system. Available from: [https://atmosphericdispersion.fandom.com/wiki/National\\_Centre\\_of\\_Scientific\\_Research\\_%22DEMOKRITOS%22#The\\_DETRACT\\_atmospheric\\_dispersion\\_modeling\\_system](https://atmosphericdispersion.fandom.com/wiki/National_Centre_of_Scientific_Research_%22DEMOKRITOS%22#The_DETRACT_atmospheric_dispersion_modeling_system) [Accessed 31th July 2023].
159. Uliasz, M., 1993. The atmospheric mesoscale dispersion modeling system. *J. of Applied Meteorology*, 32, pp. 139-149.
160. Van Jaarsverld, J., Van Pul, W., 1997. De Leeuw F.A.A.M. Modeling transport and deposition of persistent organic pollution in the European region. *Atmospheric Environmental*, 32, pp. 1011-1024.
161. Ventcatram, A., 1999. The Development and Application of a Simplified Ozone Modelling System (SONS). *Atmospheric Environment*, 28(22), pp. 3365-3678.
162. Vukovich, F. and King, W., 1980. A Theoretical Study of the St. Louis Heat Island: Comparisons Between Observed Data and Simulation Result on the Urban Heat Island Circulation. *J. App. Met.*, 19(7), pp. 761-778.
163. WindRose PRO Help by Enviroware srl. Available from: [https://www.enviroware.com/windrose/help/load\\_isc3st.shtml](https://www.enviroware.com/windrose/help/load_isc3st.shtml) [Accessed 31th July 2023].
164. Yokoyama, O, Gamo, M. and Yamamoto, S., 1977. The vertical profiles of the turbulence quantities I the atmospheric boundary layer. *J. Met. Soc.*, 55(3), pp. 264-272.
165. Yu-Ning, H., 2018. On the classical Bradshaw – Richardson number, Its generalized form, properties, and application in turbulence. *Physics of Fluids*, 30(12), 125110.
166. Zhang, R., Migxing, W. and Qingcun, Z., 2012. Global Two-Dimensional Chemistry Model and Simulation of Atmospheric Chemical Composition. *Advances in Atmospheric Sciences*, 17(1), pp. 72-82.

Статья поступила в редакцию 10.10.2024; одобрена после рецензирования 11.10.2024; принята к публикации 06.11.2024.

The article was submitted 10.10.2024; approved after reviewing 11.10.2024; accepted for publication 06.11.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья

 УДК 632.122 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-65-81> EDN VXTULT

## Технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв и грунтов: обзор патентов

Владислав Эдуардович Симонов<sup>1</sup>, Татьяна Александровна Леконцева<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия<sup>1</sup> [simonovvladislav71@gmail.com](mailto:simonovvladislav71@gmail.com)<sup>2</sup> [lekoncevatatiana28@gmail.com](mailto:lekoncevatatiana28@gmail.com)

**Аннотация.** В работе представлен анализ основных направлений патентования технологий биоремедиации почв и грунтов, которые были подтверждены нефтяному загрязнению. Рассмотрены методы очистки почв и вод с использованием микроорганизмов и растений. Выделены основные аспекты проведения биоремедиации в зоне действия нефтяных загрязнителей. Основное внимание уделяется методу использования растений в очистке почв, загрязненных нефтепродуктами. Приводится классификация фиторемедиации и особенности действия приведенных методов очистки. Отмечены основные достоинства фиторемедиации, как метода применения для очистки при нефтяных загрязнениях. Анализируются основные виды, семейства растений и частота их применимости в очистке. Определяется механизм действия фиторемедиационных технологий. Проводится анализ подготовительных мероприятий для проведения фитотестирования. Учитываются основные свойства растений, как поглотителей тяжелых металлов.

**Ключевые слова:** биоремедиация, нефтяное загрязнение, очистка почвы, патенты, рекультивация, фиторемедиация.

**Для цитирования:** Симонов В.Э., Леконцева Т.А. Технологии биоремедиации нефтезагрязненных почв и грунтов: обзор патентов // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 65-81. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-65-81>. EDN VXTULT.

## SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

## Bioremediation technologies of oil-contaminated soils and subsols: patent review

Vladislav E. Simonov<sup>1</sup>, Tatyana A. Lekontseva<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Perm State University, Perm, Russia<sup>1</sup> [simonovvladislav71@gmail.com](mailto:simonovvladislav71@gmail.com)<sup>2</sup> [lekoncevatatiana28@gmail.com](mailto:lekoncevatatiana28@gmail.com)

**Abstract.** The paper presents an analysis of the main directions of patenting technologies for bioremediation of soils and subsols, which have been confirmed by oil pollution. Methods of soil and water purification using microorganisms and plants are considered. The main aspects of bioremediation in the zone of action of oil pollutants are highlighted. The main attention is paid to the method of using plants in the purification of soils contaminated with petroleum products. The classification of phytoremediation and the features of the action of the above purification methods are given. The main advantages of phytoremediation as a method of application for purification in oil pollution are noted. The main species, families of plants and the frequency of their applicability in cleaning are analyzed. The mechanism of action of phytoremediation technologies is determined. The analysis of preparatory measures for conducting phytotesting is carried out. The basic properties of plants as heavy metal scavengers are taken into account.

**Keywords:** bioremediation, oil pollution, soil purification, patents, reclamation, phytoremediation.

**For citation:** Simonov, V. and Lekontseva, T., 2024. Bioremediation technologies of oil-contaminated soils and subsols: patent review. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 65-81. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-65-81>. EDN VXTULT. (in Russian)

### Теоретические аспекты биоремедиации как метода восстановления природной среды

Биоремедиация – процесс, заключающийся в очистке природных компонентов окружающей среды от токсичных химических соединений, в основе которого лежит биохимический потенциал микроорганизмов (бактерий, грибов), водорослей и высших растений [85]. Программу создания условий для естественного самоочищения, то есть биоремедиации, принято называть биоремедиационными технологиями. Важнейшее преимущество биоремедиационных технологий заключается в их безопасности для окружающей среды [6], так как в процессе очистки используется способность бактерий, грибов, растений и водорослей метаболизировать органические и химические вещества [7].

Применение биоремедиационных технологий предполагает мягкое воздействие на очищаемую среду, и

как правило, по сравнению с остальными методами очистки биоремедиация отличается меньшей стоимостью и трудозатратами, это и является ключевым фактором обширного применения таких технологий [85]. Единственным недостатком применения биоремедиационных технологий это низкая скорость биодеградации токсиканта и необходимость проведения предварительного обследования загрязненного участка для уточнения технологических режимов биотехнологических работ [85].

Биоремедиация делится на две главные группы методов, характер деления различается по месту проведения очистки, «*in situ*» (на участке, загрязненном субстрате, на месте, где произошло загрязнение) или «*ex situ*» (в специально оборудованных системах/установки, куда доставляется загрязненный субстрат для обработки биологическими методами) [72]. На рис. 1 / fig. 1 представлена классификация методов биоремедиации.

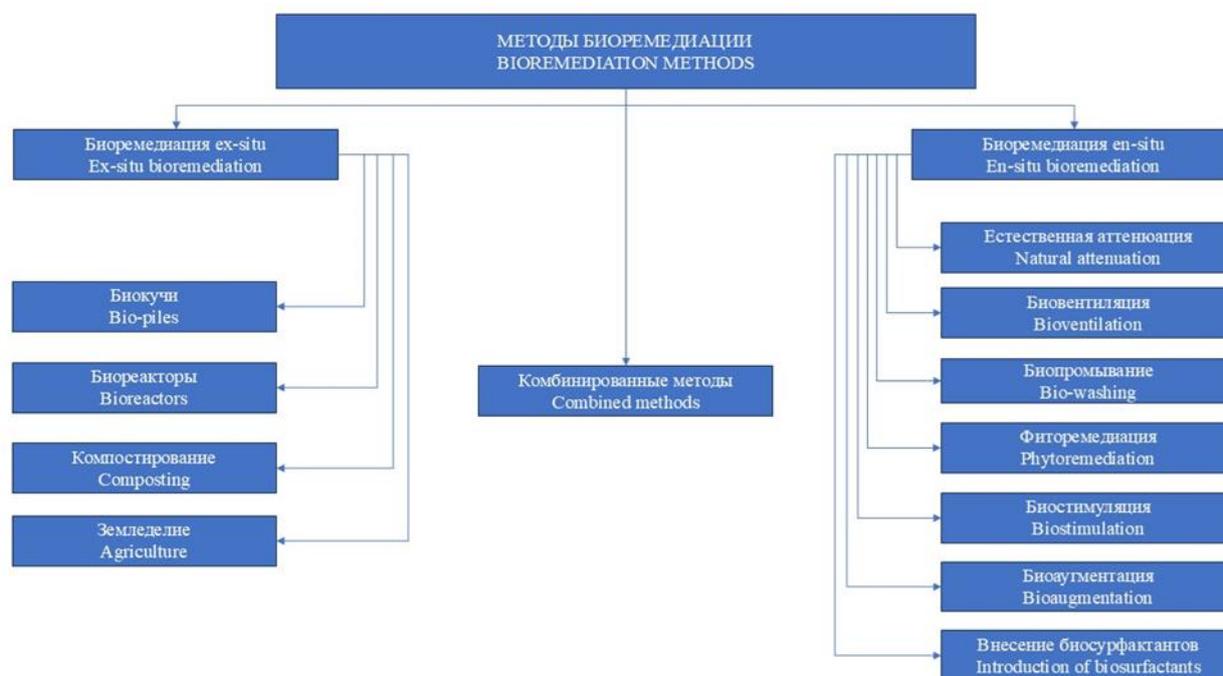


Рис. 1. Методы биоремедиации [72]

Fig. 1. Methods of Bioremediation [72]

Биоремедиация имеет свою классификацию методов, как показано на рис. 1 / fig. 1 и чаще всего эти методы приурочены к конкретному виду использования живых организмов для очистки природных компонентов. Например, для восстановления нефтезагрязненных почв, используется такой метод как фиторемедиация, комплексный метод, включающий использование растений для извлечения, накопления, деградации,

фильтрации, стабилизации и улетучивания загрязняющих веществ из почвенных и водных сред. Растения, по сравнению с другими живыми объектами, например, микроорганизмами, способны поглощать тяжелые металлы. Классификация методов фиторемедиации включает в себя 6 видов очистки почв и грунтов. В таблице 1 / table 1 показана классификация видов фитотестирования и основные области их применения [19].

Таблица 1

## Классификация методов фиторемедиации [19]

Table 1

## Classification of Phytoremediation Methods [19]

Метод фиторемедиации // Phytoremediation method	Характеристика // Characteristic	Область применения // Scope of application
Фитоэкстракция // Phytoextraction	Поглощение корнями растений загрязняющих веществ и их накопление в надземной части. Растение сжигается, а пепел утилизируется. // The absorption of pollutants by plant roots and their accumulation in the aboveground part. The plant is burned and the ashes are disposed of.	Ширица гибридная ( <i>Amaranthus hybridus</i> L.), способная поглощать Pb и Cd из почвы. // Hybrid wheat ( <i>Amaranthus hybridus</i> L.), capable of absorbing Pb and Cd from the soil.
Ризофилтрация // Rhizofiltration	Сосредоточение загрязняющих веществ в прикорневой зоне. // Concentration of pollutants in the root zone.	Способность поглощения радиоактивных веществ Подсолнечником однолетним ( <i>Helianthus annuus</i> ). // The ability of absorption of radioactive substances by annual sunflower ( <i>Helianthus annuus</i> ).
Фитоволатилизация // Phytovolatilization	Поглощение загрязняющих веществ растением и дальнейшее их выделение в атмосферный воздух. // The absorption of pollutants by the plant and their further release into the atmospheric air.	Испарение трихлорэтилена топодем ( <i>Populus</i> ). // Evaporation of trichloroethylene by poplar ( <i>Populus</i> ).
Фитостимуляция // Phytostimulation	Растения, которые способны стимулировать рост микроорганизмов, принимающие участие в процессе очищения почвы. // Plants that are able to stimulate the growth of microorganisms involved in the process of soil purification.	Выращивание овсяницы тростниковой ( <i>Festuca arundinacea</i> ) для разложения углерода. // Cultivation of reed fescue ( <i>Festuca arundinacea</i> ) for the decomposition of carbon.
Фитостабилизация // Phytostabilization	Иммобилизация и локализация загрязняющих веществ с целью предотвращения миграции загрязняющих веществ в почве, а также их движение в результате эрозии и дефляции. Аккумуляция загрязнителя происходит в околоразветвляющей зоне. // Immobilization and localization of pollutants in order to prevent the migration of pollutants into the soil, as well as their movement as a result of erosion and deflation. The accumulation of the pollutant occurs in the near-root zone.	Использование язвенника обыкновенного ( <i>Anthyllis vulneraria</i> ) на почвах, загрязненных Cd, Zn и Pb. // The use of common canker ( <i>Anthyllis vulneraria</i> ) on soils contaminated with Cd, Zn and Pb.
Фитодегградация // Phytodegradation	Дегградация растениями и симбиотическими микроорганизмами органической части загрязнений. // Degradation of the organic part of pollution by plants and symbiotic microorganisms.	Тополя ( <i>Populus</i> ), которые способны разлагать молекулы метил-трет-бутилового эфира. // Poplars ( <i>Populus</i> ), which are capable of decomposing methyl tert-butyl ether molecules.

**Анализ базы данных растений, используемых в фиторемедиации**

В одной из изученных баз данных, именуемой PHYTOREM, имеется большое количество информации по использованию растительных организмов в фиторемедиации, а также отмечается их практическое использование в решении прикладных задач, по очистке почв от тяжелых металлов по всему миру [85].

Согласно изученным характеристикам, растения фиторемедианты должны обладать способностью к быстрому росту и гипераккумуляции ионов металлов в зеленой массе. Способность растения к гипераккумуляции определяется коэффициентом бионакопления – отношением концентрации токсиканта в побегах к концентрации в почве. Гипераккумуляторы способны поглощать определенные металлы в количестве, составляющем несколько процентов от веса их сухой биомассы [85].

Предварительно, изученная база данных содержит 775 зарегистрированных видов растений, принадлежащих к 76 семействам. В нее попали не только

сосудистые растения, но также и другие организмы, такие как бактерии, водоросли, лишайники, грибы и мхи [85].

В базе данных растения распределяются по их способностям аккумулировать, гипераккумуляторы, осаждают или проявляют устойчивость по отношению к определенным тяжелым металлам. По большей части растения рассматриваются как аккумуляторы, если они накапливают металлы в концентрации 100–200 мг/кг сухой массы, гипераккумуляторами, если они поглощают более 1000 мг/кг сухой массы для большинства тяжелых металлов, 10000 мг/кг для марганца или 100 мг/кг для кадмия. Было обнаружено, что 465 видов растений проявляют некоторые способности для ремедиации по какому-либо одному элементу. Кроме того, 66 видов обладают способностью поглощать два элемента, тогда как 25 видов проявляют способность аккумулировать три элемента. Наиболее широкие способности к аккумуляции металлов (до четырех элементов и более) проявляют 15 видов, перечисленных в таблице 2 / table 2 [85].

Таблица 2

## Список растений с наиболее высокими величинами аккумуляции металлов PHYTOREM [85]

Table 2

## List of plants with the highest PHYTOREM metal accumulation values [85]

Элемент // Element	Растение с наиболее высокой зафиксированной концентрацией // The plant with the highest recorded concentration	Происхождение растения // The origin of the plant	Максимальная аккумулируемая концентрация (мг/кг сухой массы) // Maximum accumulated concentration (mg/kg dry weight)
Al	<i>Solidago hispida</i>	Канада // Canada	6 820
As	<i>Agrostis tenuis (capillaris)</i>	Культивируемое // Cultivated	2 000
Cd	<i>Vallisneria spiralis</i>	Индия // India	6 242
Co	<i>Haumanistrum robertii</i>	Африка // Africa	10 200
Cr	<i>Medicago sativa</i>	Культивируемое // Cultivated	7 700
Cs	<i>Heliantus annuus</i>	Культивируемое // Cultivated	Высокое поглощение // High absorption
Cu	<i>Larrea tridentate</i>	США // USA	23 700 биопоглощение // 23 700 bioabsorption
Hg	<i>Pistia stratiotes</i>	Повсеместно в тропиках // Everywhere in the tropics	1 100
Mn	<i>Macdemia neurophylla</i>	Новая Каледония // New Caledonia	51 800
Mo	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Европа // Europe	1 500-1 800
Ni	<i>Psychotria douarrei</i>	Новая Каледония // New Caledonia	4 500
	<i>Hybanthus floribundus</i>	Австралия // Australia	22% всей золы // 22% of all ash
Pb	<i>Brassica jincea</i>	Культивируемое // Cultivated	26 200
Sr	<i>Helianthus annuus</i>	Культивируемое // Cultivated	Высокое поглощение // High absorption
U	<i>Helianthus annuus</i>	Культивируемое // Cultivated	>15 000
Zn	<i>Thlaspi caerulescens</i>	Европа // Europe	52 000

Фиторемедиация, как уже было упомянуто, приобрела большую популярность, что отчасти связано с её низкой стоимостью. Данная технология на порядок дешевле других методов, поскольку не требует энергетических затрат и специального оборудования. Так как фиторемедиация предусматривает применение очистки прямо на месте загрязнения, что означает отсутствие транспортных затрат и уменьшению взаимодействия загрязнённого субстрата с людьми и окружающей средой [18].

#### Технологические приемы для фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов

Растения способны самостоятельно метаболизировать органические поллютанты [40], повышать биологическую активность почвы и [39], за счет обогащения почвы азотом, стабилизируют соотношение азота и углерода в почве, которое при нефтяном загрязнении значительно сдвигается в сторону последнего [62].

Для фиторемедиации нефтезагрязненных почв используются 4 из 6 основных описанных выше методов фиторемедиации:

Фитостабилизация – накопление растительностью нефтепродуктов в клетках из почвы и грунтовых вод [1].

Фитодеградация – разложение углеводов в результате метаболизма растения и корневых выделений в почву [1].

Фитоволатилизация – поглощение нефтепродуктов и испарение их в атмосферный воздух [1].

Фитостимуляция – разложение углеводов микроорганизмами, обитающих в области ризосферы растений [1].

В эксперименте, проведенном Н.О. Симагиной [70], в качестве нефтепродуктов использовалась смесь дизельного топлива и бензина в соотношении 1:3. Почва искусственно загрязнялась нефтепродуктами, и поддавалась выращиванию на ней растений горчицы и овса, результат эксперимента показал, что более чувствительны к загрязнению оказались растения горчицы, а выживаемость семян овса напрямую зависела от содержания нефтепродуктов в почве.

Для оценки влияния загрязнения почвы нефтепродуктами на снижение биомассы исследуемых растений обычно используется относительный показатель – фитотоксический эффект. Данный показатель характеризует процент снижения биомассы растений, выросших на загрязнённой почве, относительно биомассы растений, выращенных на «условно чистой» почве. У растений горчицы проявляется положительное значение фитотоксического эффекта, что указывает на угнетение роста и, в некоторых случаях, на гибель растений [9, 10, 11, 12, 70].

В другом эксперименте, проводимом в работе Н.А. Киреевой, Е.М. Тарасенко, М.Д. Бакаевой [40] приведены результаты влияния посевов люцерны (*Medicago sativa* L.) на ферментативную активность и численность углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) и на интенсивность разложения углеводов

нефти. Темно-серая лесная почва загрязнялась товарной нефтью в концентрациях 1-15 %. Исследования проводили через 3, 30, 60, 90 и 180 суток после внесения поллютанта [40]. В результате эксперимента было установлено, что посев фиторемедианта в нефтесодержащую почву способствовал увеличению численности УОМ относительно некультивируемых образцов на 2 и 5 порядков при концентрации поллютанта 10 % и 5 % соответственно через 60 суток и на 3 порядка – через 180 суток. Усиленный рост численности УОМ в ризосфере люцерны связан с более благоприятными условиями в ней [40].

Почвенные ферменты каталаза и липаза катализируют важнейшие метаболические процессы, включая разложение органических соединений и детоксикацию ксенобиотиков, поэтому они имеют важное диагностическое значение [19]. Первоначально наблюдалось ингибирующее действие нефти на липолитическую активность. Но со временем она достигала уровня контрольного варианта. Причем рост активности фермента происходил пропорционально концентрации загрязнителя. Под посевами люцерны наблюдалось увеличение липолитической активности по сравнению с нефтесодержащей почвой в среднем в 1,7 раз через 180 суток [18].

Максимальное значение липазной активности отмечалось на 90 сутки после загрязнения при концентрациях нефти от 1 до 5 %. В дальнейшем отмечалось ее снижение вследствие уменьшения доступного субстрата в связи с разложением нефти и снижения численности УОМ. При более высоких дозах нефти наблюдался постоянный рост активности липазы на протяжении всего периода наблюдений, что свидетельствует о продолжении процесса деконтаминации почвы [40].

В то же время компоненты нефти значительно ингибировали каталазную активность. Особенно явно это наблюдалось в пробах с содержанием поллютанта 10 % и выше. Использование фиторемедианта при таких дозах загрязнителя значительно снижало ингибирование каталазной активности [18, 39, 40].

В эксперименте показано, что наравне с усилением биологической активности почвы активно протекал процесс ее очистки. К концу инкубационного периода в почве под посевами разлагается до 95, 75 и 70 % нефти при 5, 10 и 15 % первоначальном загрязнении соответственно [40].

Проведенный эксперимент показал, что посев люцерны является эффективным приемом ремедиации, однако важно учесть негативное влияние нефти на рост и развитие самих растений. При концентрации 1-5 % наблюдалось токсическое воздействие нефти на рост растений. Средняя масса стеблей и листьев люцерны даже в слабозагрязненной почве через 2 месяца инкубации отличались от контроля в 7 раз. Загрязнение почвы углеводородами нефти меняло морфологию корней люцерны. Со временем негативное влияние нефти на корневую систему уменьшалось. При высоких концентрациях поллютанта (10-15 %) наблюдалось сильное токсическое действие, что приводило к гибели большинства растений и нивелированию эффекта ремедиации [40].

Таким образом, под посевами люцерны уменьшалось содержание остаточной нефти, увеличивалась численность УОМ, усиливалась липолитическая и каталазная активность почвы. Применение данного метода целесообразно только в том случае, когда исходная концентрация поллютанта не будет превышать 5 % по массе или уровень загрязнения будет снижен до данного значения [39].

Выявлено разнообразие аэробных нефтеокисляющих бактерий, ассоциированных с растениями. Среди них определены виды *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aureginosa*, *Burkholderia cepacia*, *Aeromonas hydrophilla*, *Pseudomonas fluorescens* [2].

Объектами исследований служили новые изоляты (25 типовых штаммов), выделенные из загрязненной нефтью почвы, с корней 27 растений. Бактерии выращивали на среде «М9» с 0,5 % содержанием нефти при температуре 28 °С в течение 5 суток [2].

В результате были выделены и идентифицированы 5 штаммов нефтеокисляющих микроорганизмов, способных к колонизации корней растений. Выявлены 3 штамма патогенных бактерий из числа колонизаторов корней растений. Установлено, что штамм *Pseudomonas putida* колонизирует корни ржи с плотностью от  $6 \cdot 10^5$  до  $8 \cdot 10^5$  КОЕ, штамм *Pseudomonas fluorescens* – с плотностью от  $3 \cdot 10^5$  до  $7 \cdot 10^5$  КОЕ, что позволяет их рекомендовать для фиторемедиации загрязненных нефтью почв [2].

Фиторемедиация эффективно справляется с очисткой нефтесодержащих почв путем аккумуляции нефти и нефтепродуктов растениями-фиторемедиантами и увеличением численности и активности бактерий-деструкторов углеводородов, обитающих совместно с растениями-фиторемедиантами. К самым популярным растениям-фиторемедиантам для нефтесодержащих почв относятся: овес посевной, люцерна посевная, рожь посевная.

#### **Технология фиторемедиации почв и грунтов, загрязненных нефтью**

Фиторемедиация нефтесодержащих почв – технология очистки почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами с помощью растений и ассоциированных с ними организмов [1].

Технология фиторемедиации нефтесодержащей почвы состоит из нескольких этапов [1]:

1. Оценка характера загрязнения участка (химический состав разлива, степень проникновения нефти в почву, картирование).

2. Разработка оптимальной схемы фиторемедиации (подбор видового состава растений, определение схемы посадки, выбор необходимых агротехнических мероприятий, в том числе оптимизация питания и химическая защита растений).

3. Выращивание растений (проведение комплекса агротехнических мероприятий, в том числе подготовка семенного материала, подготовка почвы, внесение минеральных удобрений, использование средств защиты).

4. Мониторинг участка (определение концентрации и распространения химических компонентов нефти, отслеживание путей биодegradации нефти, проведение информационного анализа и прогнозирования).

Помимо непосредственно подбора растений-фиторемедиантов немаловажную роль в фиторемедиационных технологиях играет необходимость подготовки для проведения конкретной фиторемедиационной технологии, внесения препаратов и удобрений в рамках проведения конкретной фиторемедиационной технологии, тип почвы или приуроченность к определенной природной зоне, на которых может быть проведена фиторекультивация с применением конкретной технологии фиторемедиации, длительность процесса фиторекультивации, которая заложена в конкретной фиторемедиационной технологии, опробирование конкретной фиторемедиационной технологии и описание полученного опыта, анализ и оценка результатов эффективности проведения конкретной фиторемедиационной технологии. Данные аспекты отражены в базе данных запатентованных технологий фиторемедиации для возможности получить наиболее полное представление об изученных фиторемедиационных технологиях.

Данные аспекты могут оказать большое влияние на выбор наиболее подходящей фиторемедиационной технологии среди множества других. Например, наличие временных, технических и финансовых возможностей для проведения подготовки к фиторемедиационным мероприятиям и использования препаратов, удобрений и других веществ, предусмотренных технологией; приуроченность нефтезагрязненной территории к определенной природной зоне или типу почв; наличие в запасе времени, которое можно потратить на проведение фиторемедиационных мероприятий.

Необходимость проведения подготовки для осуществления фиторемедиационных мероприятий – важный аспект, на который следует обратить внимание при выборе способа фиторемедиации. Поскольку подготовка требует дополнительных временных, финансовых и технических ресурсов.

#### **Анализ запатентованных технологий фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов**

Патент – охраняемый документ, удостоверяющий приоритет изобретения, полезной модели или промышленного образца, авторство и исключительное право на изобретение, полезную модель или промышленный образец на территории Российской Федерации [18].

Патентный поиск – это проверка и выявление патентов в конкретной области, у конкретной организации или лица. С помощью проведения такого поиска можно косвенно оценить состояние научно-технического развития в исследуемой области в целом, оценить количество запатентованных технологий и выявить основные направления исследования в данной сфере [82].

Поиск и изучение патентной документации в области фиторемедиации почв и грунтов проводился на Интернет-ресурсах:

- WIPO/ВОИС – Поиск по национальным патентным фондам и фондам РСТ (<https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf?ref=vc.ru>),

- РосПатент (<https://searchplatform.rospatent.gov.ru/patents>),

- Яндекс.Патенты (<https://yandex.ru/patents>).

Всемирная организация интеллектуальной собственности (ВОИС) – международная организация, занимающаяся администрированием ряда ключевых международных конвенций в области интеллектуальной собственности, в первую очередь Бернской Конвенции об охране литературных и художественных произведений и Парижской Конвенции об охране промышленной собственности. Также выполняет функции специализированного учреждения Организации Объединённых Наций по вопросам творчества и интеллектуальной собственности. Система данного ресурса PATENTSCOPE позволяет вести поиск патентов по национальным патентным фондам и фондам РСТ среди 115 млн патентных документов, представленных в данной системе.

Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент) является правопреемником Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, а также правопреемником Министерства юстиции Российской Федерации в части, касающейся правовой защиты интересов государства в процессе экономического и гражданско-правового оборота результатов научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ военного, специального и двойного назначения, в том числе по обязательствам, возникающим в результате исполнения судебных решений. Платформа данной организации предоставляет возможность проведения поиска по мировому патентному фонду, включающему 26 стран и организаций, в том числе все доступные русскоязычные массивы [61, 63].

Яндекс.Патенты – сервис компании «Яндекс», созданный при содействии Федеральной службы по интеллектуальной собственности (Роспатента). В базе «Яндекса» собрано более 2,5 миллиона патентных документов. На сервисе представлены российские патенты на полезные модели и изобретения, патентные заявки, а также авторские свидетельства СССР с 1924 г. по сегодняшний день – что делает данный ресурс одним из самых крупных в Рунете бесплатных массивов патентной информации. Данный ресурс располагает идентичной патентной информацией, представленной на сайте Роспатента, однако он также использовался как отдельный инструмент для подбора патентов ввиду возможных различий в поисковых алгоритмах и фильтрах между данным сервисом и платформой поиска патентов Роспатента [62].

Для комплексного анализа методов фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов поиск в указанных выше интернет-ресурсах велся по поисковым запросам:

- 1) фиторемедиация нефтезагрязненных почв;
- 2) метод фиторемедиации нефтезагрязненных почв;
- 3) метод фиторемедиации почв, загрязненных углеводородами.

Далее изучались отобранные поисковой системой патенты. Среди данной выборки выбирались патенты с описанными методами фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов, а также с методами рекультивации/очистки нефтезагрязненных почв, где фиторемедиация является одним из этапов рекультивации/очистки.

Всего отобрано и проанализировано 47 запатентованных технологий. Среди них 7 запатентованных методов фиторемедиации было найдено с помощью интернет-ресурса ВОИС, 11 – с помощью интернет-ресурса РосПатент, 29 – с помощью интернет-ресурса Яндекс.Патент.

В целом идеальными кандидатами для фиторемедиации нефтезагрязненных почв являются растения, которые: географически широко распространены, имеют высокие темпы роста и большую биомассу, обладают способностью к аккумуляции загрязняющих веществ и обладают устойчивостью к загрязнению нефтью и нефтепродуктами для возможности их выращивания на рекультивируемом участке [62].

Растения-фиторемедианты выбираются также исходя из соображений пригодности для использования на нефтезагрязненной территории, относящейся к определенной природной зоне или типу почв, например, пустыни или зоны многолетней мерзлоты. В некоторых случаях могут быть использованы аборигенные виды растений, произрастающих в местности, где располагается рекультивируемая территория. Часто это могут быть растения, которые применяются в рамках биоиндикационных исследований [28, 35, 36, 60, 73, 74].

Для фиторемедиации нефтезагрязненных территорий используются различные растения: от мхов до деревьев. Наиболее часто применяются в фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов представители семейства Злаки (*Poaceae*). Костер безостый (*Bromus inermis*) – 13 патентов [8, 34, 35, 41, 43, 44, 45, 52, 53, 54, 56, 58, 75], Овес посевной (*Avena sativa*) – 11 патентов [4, 20, 21, 35, 42, 46, 58, 64, 66, 65, 67], виды рода Овсяница (*Festuca*) – 10 патентов [8, 29, 41, 42, 52, 53, 56, 58, 75, 80], Ежа сборная (*Dactylis glomerata*) – 6 патентов [8, 30, 41, 52, 53, 80], виды рода Пырей (*Elytrigia*) – 6 патентов [8, 52, 53, 68, 69, 75], виды рода Мятлик (*Poa*) – 5 патентов [6, 29, 52, 56, 75], Рожь озимая (*Secale cereale*) – 5 патентов [5, 12, 64, 65, 67],

А также представители семейства Бобовые (*Fabaceae*). Виды рода Клевер (*Trifolium*) – 9 патентов [30, 31, 34, 35, 41, 47, 52, 53, 54], Горох посевной (*Lathyrus oleraceus*) – 7 патентов [20, 21, 35, 42, 66, 67, 77], Люцерна посевная (*Medicago sativa*) – 6 патентов [12, 30, 57, 58, 67, 66], Донник белый (*Melilotus albus*) – 5 патентов [30, 64, 65, 68, 69].

Стоит отметить, что некоторые рода растений включают несколько видов, пригодных для использования в качестве растения-фиторемедианта на нефтезагрязненной почве. К ним относятся. Род Овсяница (*Festuca*) – 6 видов, род Клевер (*Trifolium*) – 5 вида, род Ива (*Salix*) – 3 вида, род Полевица (*Agrostis*) – 3 вида, род Полынь (*Artemisia*) – 3 вида, рода Житняк (*Agropyron*), Мятлик (*Poa*), Пырей (*Elytrigia*), Сорго (*Sorghum*) – 2 вида.

Также известна моновидовая фиторемедиация, когда применяются растения только одного вида, только в 10 технологиях среди 47 изученных технологий фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов применяется моновидовая фиторемедиация [4, 17, 31, 43, 44, 45, 57, 76, 83, 84]. Чаще всего встречалось использование двух видов растений, самое большое количество растений, использовалось только в одном патенте, в количестве 12 видов.

Известно, что при наличии в севообороте многолетних бобовых и злаковых трав снижается токсичность, существенно улучшается санитарное состояние почвы, улучшается аминокислотный состав зеленой массы [16, 32].

Фиторемедиационные процессы, лежащие в основе изученных технологий, были классифицированы, имели вид использования, фитодеградация в 42 патентах, фитостимуляция в 27 патентах, фитостабилизация в 3 патентах.

Фитодеградация – деградация растениями и симбиотическими микроорганизмами органической части загрязнений. Фитостимуляция заключается в использовании растений, которые стимулируют рост микроорганизмов, принимающих участие в процессе очистки. Процессы фитодеградации и фитостимуляции неразрывно связаны между собой. Фитостабилизация – локализация и удержание загрязняющих веществ с целью предотвращения их миграции [20].

Растения семейств Бобовых и Злаков за счет симбиотических азотфиксаторов способны повышать микробиологическую активность и плодородие почв, поэтому их часто рекомендуют использовать при проведении работ по восстановлению нарушенных и загрязненных территорий [39, 40].

Корни растений семейства Бобовые экскретируют нейтральные аминокислоты, в результате чего изменяется соотношение азота и углерода в почве. Так как в нефтезагрязненных почвах часто наблюдается дефицит доступного азота, корневые выделения бобовых растений могут его восполнить [40, 78].

Также два патента содержат описание фиторемедиационных технологий, обозначенных в базе данных как «повышение нефтеразрушающих, фитозащитных и ростостимулирующих свойств фиторемедиантов». Под данным термином понимается улучшение свойств и характеристик растений-фиторемедиантов для улучшения их фиторемедиационной функции. Этот процесс происходит путем внесения бактериальных препаратов, минеральных удобрений, особой подготовки почвы и семян, особый способ выращивания растений [75, 77].

Стоит отметить, что 27 технологий сочетают в себе два основных фиторемедиационных процесса, за счет которых происходит рекультивация почв и грунтов.

Важную роль в фиторемедиации наряду с растениями-фиторемедиантами играют их симбиотические микроорганизмы. Такие растительно-микробные ассоциации очень эффективны и популярны для использования в фиторемедиации [47].

Анализируемые технологии чаще всего делились на монофиторемедиационные и фиторемедиационные технологии (с применением растительно-микробных ассоциаций) в 26 и 21 патентах соответственно.

К технологиям, в которых применяются растительно-микробные ассоциации, были отнесены технологии, в тексте которых были указаны конкретные рода или штаммы микроорганизмов, вносимых извне или аборигенных микроорганизмов, выделенных при исследовании почвы в лабораторных условиях, ввиду их значительного влияния на фиторемедиационные процессы. Остальные технологии были отнесены в категорию монофиторемедиационных.

Растительно-микробные ассоциации способны формироваться как естественным образом, так и путем внесения в почву или предварительной бактериализации семян растений бактериальными препаратами [19, 39, 40].

Использование растительно-микробных ассоциаций в фиторемедиации основано на естественных процессах разложения нефти в природе с участием микроорганизмов, способных окислять углеводороды. Однако при попадании в почву, микроорганизмы-нефтедеструкторы неизбежно вступают в контакт с растениями, произрастающими на загрязненных территориях. Их воздействие на растения осуществляется несколькими способами: непосредственное выделение внеклеточных биологически активных веществ, таких как фитогормоны; опосредованное воздействие путем разрушения пленки нефти, обволакивающей корневые волоски, для улучшения дыхания растений и получения питательных веществ, заблокированных нефтяной пленкой. Таким образом, с растения снимается не только негативный эффект нефти, но и происходит стимуляция роста и развития. Поэтому использование микроорганизмов может обеспечить как приживаемость и стимуляцию роста высаженных в загрязненную почву растений, так и биодegradацию загрязнителя в почве или грунте [50, 66].

В составе растительно-микробных ассоциаций, используемых для фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов, наиболее часто встречаются следующие микроорганизмы: *Azotobacter*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Sinorhizobium*, *Azospirillum*, *Lactobacillus*, Аборигенные штаммы нефтеокисляющих микроорганизмов.

Данные рода микроорганизмов проявляют азотфиксирующие и углеводородоокисляющие свойства, за счет чего вносят свой вклад в рекультивацию нефтезагрязненных почв и грунтов [19, 39, 40].

На основании анализа запатентованных технологий фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов выявлено, что для 23 из 47 отобранных способов фиторемедиации требуется разного рода подготовка.

В изученных фиторемедиационных технологиях подготовка классифицируется на 4 категории: механическая подготовка нефтезагрязненной почвы, подготовка растений-фиторемедиантов и их семян, обработка нефтезагрязненной почвы веществами, подготовка микроорганизмов.

Механическая подготовка нефтезагрязненной почвы для проведения фиторемедиации – 10 патентов. К данной категории относятся: вспашка [4, 31, 58, 43], выравнивание [43], рыхление [68, 69], чизеливание [68, 69], механическое удаление избытков нефти и нефтепродуктов с поверхности почвы или грунта [64], механическая обработка [27, 29, 84].

Подготовка растений-фиторемедиантов или их семян – 12 патентов. В данную категорию входят: стерилизация семян [77], бактериализация/замачивание семян с использованием биопрепаратов [31, 43, 54, 64, 77, 81], вымачивание корневых систем растений с использованием биопрепаратов [48, 56, 80], выращивание растений на незагрязненной почве до требуемого возраста [41, 59, 83], обработка растений лазером [48].

Обработка нефтезагрязненной почвы или грунта различными веществами – 4 патента. К данной категории относятся: внесение удобрений [21, 29], нанесение органоминерального грунта [75], обработка почвы или грунта в твердо-жидкофазном биореакторе [34].

Подготовка микроорганизмов для использования в составе растительно-микробных ассоциаций – 2 патента. В данную категорию входят: выявление аборигенных штаммов микроорганизмов для конкретной нефтезагрязненной территории [21], инкубация микроорганизмов [5].

Для изученных фиторемедиационных технологий подготовка занимает от нескольких часов (замачивание семян, вспашка) до нескольких лет (заготовка дичков, выращивание растений 2-го года жизни, при условии самостоятельной их подготовки).

Следующим важным аспектом является внесение веществ в нефтезагрязненную почву или грунт. Среди отобранных 47 запатентованных фиторемедиационных технологий в 25 технологий предусмотрено внесение различных веществ. минеральные удобрения – 18 патентов, бактериальные препараты – 7 патентов, грунты (песок, торф и другие) – 6 патентов, биопрепараты – 5 патентов, антибиотики – 1 патент.

Минеральные удобрения – вещества промышленного или ископаемого происхождения, с высоким содержанием доступных растениям питательных элементов, позволяющие быстро и точно регулировать минеральное питание растений. В большинстве случаев это растворимые минеральные соли и органические соединения, например, соли калия, магния и азота [49].

В изученных запатентованных технологиях используются такие минеральные удобрения, как: азофоска [64], нитроаммофоска [38], нитрофоска [8], калий хлористый [35], селитра [50], суперфосфат [65], дегидратный фосфогипс [4], препарат «Эффект-NPK» [64], карбамид [80].

Бактериальные препараты – препараты, содержащие в составе комплекс полезных для растений почвенных микроорганизмов. Такие препараты стимулируют рост и питание растений, укрепляют защитные функции растений против болезней и вредителей, повышают продуктивность растений [16].

В изученных запатентованных технологиях используются такие бакпрепараты: «Деворойл» [47], «Биофлора» [80], «Байкал ЭМ-1» [3], «Агат-25К» [54, 56], «Фитоспорин» [64].

Грунты добавляются в почву для доведения ее до подходящего для проведения фиторемедиационных мероприятий состояния по различным физико-химическим показателям (влажность, кислотность, pH) [23, 54].

В изученных запатентованных технологиях используются такие грунты, как: песок [55], цеолитсодержащая глина – аланит [30], торф [55], глауконит [38], трепел [55], известь [65].

Биопрепараты – препараты, содержащие в составе вещества, обладающие фунгицидными, гербицидными, инсектицидными свойствами. Такие препараты стимулируют рост и развитие растений, повышает продуктивность растений, повышают устойчивость растений к заболеваниям и паразитам, защищают растения от токсического воздействия агрохимикатов [56].

В изученных запатентованных технологиях используются такие биопрепараты, как: «Альбит» [56], «Унифлор Микро» [64], «Эль-1» [80, 81], «Интеграл» [65], «Триходермин» [54], «Гумистар» [56].

Также в одной из запатентованных технологий применяется антибиотик «Нистатин». Данный антибиотик используется в этом случае для снижения численности и активности сапротрофных микромицетов, ассоциированных с растениями, являющимися продуцентами веществ, обладающих фитотоксическим действием [54].

Следующим аспектом, на который следует обратить внимание при выборе технологии фиторемедиации нефтезагрязненной почвы, это региональность или универсальность метода. Среди 47 запатентованных фиторемедиационных технологий 34 метода являются универсальными и, соответственно, 13 методов являются региональными.

Региональность или приуроченность к определенной природной зоне тесно связана с типом почв. Универсальные фиторемедиационные технологии применимы для нефтезагрязненной почвы любого типа и принадлежности к природной зоне. Региональными методами в базе данных классифицируются фиторемедиационные технологии, которые подходят для использования в специфических условиях. Например, степные [66, 67], лесостепные зоны [66, 67], пустынные и полупустынные зоны [66, 67, 68, 69], подзона предтундровых редколесий [59], торфяные болота [76], таежная зона [73], территории с переуплотненными почвами [45], земли сельскохозяйственного назначения [35], зона многолетней мерзлоты [29], северная тайга [27, 75], лесотундра [75], тундра [75], арктическая тундра [75].

Типы почв указаны для региональных методов, при наличии указания на тип почв в тексте патента, и для универсальных методов, также при наличии указания на тип почв в тексте патента, например, при описании проверки фиторемедиационной технологии на практике. Среди указанных почв и грунтов встречаются: выщелоченный чернозем [20], подзолистая и дерново-подзолистая почва [56, 83] суглинистый серозем [6], нефтезагрязненный / углеводородосодержащий грунт или шлам [81], песчаный грунт [50, 69], темно-каштановая почва [44], торфяно-болотная почва [76], серая лесная почва, вечномерзлотная почва [75].

Следующим важным аспектом в характеристике фиторемедиационных технологий является длительность проведения метода. Данный критерий имеет большое значение при выборе технологии фиторемедиации, поскольку интервал временных затрат на проведение различных методов огромен. Среди изученных 47 запатентованных технологий фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов минимальная длительность технологии составляет 15 суток, максимальная – 1095 суток или 3 года.

Стоит отметить, что длительность некоторых представленных методов фиторемедиации почв привязана к длительности вегетационного периода растений в рекультивируемой местности и, соответственно, может варьироваться в зависимости от географического положения территории.

В текстах патентов на фиторемедиационные технологии также всегда присутствует описание опыта проведения предлагаемого способа фиторемедиации на практике, по результатам которого и характеризуются все вышеописанные аспекты. Опробирование фиторемедиационной технологии может проводиться на одном или нескольких примерах. Описание опыта происходит согласно следующему плану, дается характеристика исходного состояния нефтезагрязненной почвы, уровень загрязнения, принадлежность к типу почв, физико-химические свойства; описывается методика проведения подготовительных мероприятий перед осуществлением фиторекультивации (при необходимости); описывается методика проведения технологии фиторемедиации нефтезагрязненной почвы: порядок, сроки, внесение веществ, подселение микроорганизмов; приводится описание и оценка результатов проведения предлагаемой фиторемедиационной технологии.

Количественная оценка результативности предлагаемых методов фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов (в процентах) приводится в 27 из 47 патентов. Максимальная результативность среди представленных фиторемедиационных технологий составляет 100%, минимальная – 36%.

#### **Применение технологий фиторемедиации в очистке почв и грунтов, подвергшихся нефтяному загрязнению**

В технологиях фиторемедиации нефтезагрязненных почв и грунтов помимо растений-фиторемедиантов важные роли играют такие аспекты, как необходимость подготовительных мероприятий, необходимость внесения веществ, региональность или универсальность метода, длительность проведения метода, результативность метода.

К биоремедиационным технологиям относится ряд методов очистки почв и вод с использованием микроорганизмов и растений, которые проводятся двумя способами, на месте загрязнения и с изъятием загрязненной почвы, для дальнейшей очистки вне зоны загрязнения.

Главное отличительное качество фиторемедиации, как метода очистки почв, это ее безопасность для окружающей среды. Фиторемедиация – комплексный метод очистки почв и грунтов с использованием растений и симбиотических микроорганизмов. Фиторемедиационные методы основаны на процессах фитоэкстракции, ризофльтрации, фитоволатилизации (или фитоиспарения), фитостимуляции, фитостабилизации и фитодегградации. Среди достоинств фиторемедиации: низкая стоимость, безопасность для окружающей среды, эффективность.

Фиторемедиация широко используется для очистки почв от загрязнения нефтью и нефтепродуктами. Такие растения, как: овес посевной, люцерна посевная, рожь посевная – хорошо зарекомендовали себя в качестве растений-фиторемедиантов для нефтезагрязненных почв и грунтов.

Анализ отобранных патентов показал, что наиболее популярными растениями-фиторемедиантами для почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, являются растения семейств Бобовые (клевер, горох, люцерна и другие) и Злаки (костер, овес, овсяница, ежа и другие). Механизм действия фиторемедиационных

технологий выражается в процессах фитодеградации, фитостимуляции и фитостабилизации.

Кроме растений-фиторемедиантов важную роль в фиторемедиационных технологиях играют подготовка, внесение удобрений, длительность, результативность, универсальность методов. Данные аспекты могут оказать большое влияние на выбор наиболее подходящей фиторемедиационной технологии среди множества других.

#### Сведения об авторском вкладе

В.Э. Симонов – разработка проблематики и концепции работы, структурирование исходного текста по основным обсуждаемым вопросам, подготовка первичной версии рукописи, вычитка финальной версии рукописи.

Т.А. Леконцева – первичный поиск и анализ научной литературы и патентов по фиторемедиации, вычитка финальной версии рукописи.

#### Contribution of the authors

V.E. Simonov – development of the research problems and concept, structuring the initial text by the main discussed issues, preparation of the first manuscript edition, proofreading of the final manuscript edition.

T.A. Lekontseva – primary search and analysis of scientific literature and patents on phytoremediation, proofreading of the final manuscript edition.

#### Список источников

1. Барышненская А.Ю. Изучение процесса фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: сборник трудов конференции. Белгород, 1-30 мая 2015 г. / Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. С. 433-436.

2. Баутиста Х., Валидов Ш.З., Багаева Т.В. Фиторемедиация нефтезагрязненных почв: выделение микроорганизмов, эффективно колонизирующих растения // Научная и производственная деятельность – средство формирования среды обитания человечества: материалы Всероссийской молодежной научно-практической конференции. Тюмень, 26-27 апреля 2016 г. / Тюмень: ТИУ, 2016. С. 46-48.

3. Бекузарова С.А., Александров Е.Н., Вайсфельд Л.И., Эйгес Н.С., Плиев И.Н. Патент 2555595 РФ. Способ воспроизводства нефтезагрязненных земель. № 2014109977/13. 2015.

4. Белюченко И.С., Добрыднев Е.П., Муравьев Е.И., Мельник О.А., Терещенко Е.В. Патент 2402079 РФ. Способ рекультивации почв, загрязненных нефтью. № 2008133094/10. 2010.

5. Беркович Я.В., Валидов Ш.З. Патент 2735870 РФ. Способ выделения микроорганизмов для очистки и восстановления нефтезагрязненных почв и грунтов методом фитобиоремедиации. № 2019132927. 2020.

6. Бишимбаев В.К., Исаева А.У., Мырхалыков Ж.У., Успабаева А.А., Тлеужеева А.Е. Патент 31054 Казахстан. Способ биологической очистки почв от нефти и нефтепродуктов. № 2015/0415.1. 2016.

7. Богомягкова Е.А., Дзюба Е.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024666392 РФ. Программа для расчета допустимой концентрации нефтепродуктов в почвах. № 2024665931. 2024.

8. Боронников В.Д., Шеховцов П.В., Шеховцов В.П. Патент 2066944 РФ. Способ ускоренной рекультивации почвы, загрязненной нефтепродуктами. № 94043529/13. 1996.

9. Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Дзюба Е.А. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620097 РФ. Геоинформационная база данных «Миграция углеводородов в водоохранной зоне Камского водохранилища». № 2020622892. 2021.

10. Бузмаков С.А., Дзюба Е.А., Сивков Д.Е. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620098 РФ. Геоинформационная база данных геохимических свойств почв ландшафтного заказника Предуралья. № 2020622893. 2021.

11. Бузмаков С.А., Дзюба Е.А., Сивков Д.Е. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021620099 РФ. Геоинформационная База данных геохимических свойств почв на территории Пермского края: № 2020622894. 2021.

12. Бузмаков С.А., Хотяновская Ю.В., Андреев Д.Н. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621102 РФ. Техногенная трансформация природной среды в карстовом районе. № 2021620770. 2021.

13. Бузмаков С.А., Андреев Д.Н., Назаров А.В., Дзюба Е.А., Шестаков И.Е., Куюкина М.С., Елькин А.А., Егорова Д.О., Хотяновская Ю.В. Реакция разных тест-объектов на экспериментальное загрязнение почв нефтью // Экология. 2021. № 4. С. 254-262. <https://doi.org/10.31857/S0367059721040053>

14. Бузмаков С.А., Дзюба Е.А. Оценка загрязнения почв потенциально токсичными элементами в зоне влияния добычи калийных солей // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 5. С. 46-50. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-46-50>

15. Бузмаков С.А., Егорова Д.О., Гатина Е.Л. Доза-эффект нефтезагрязнения почв на биотический компонент экосистем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25, № 2. С. 217-229. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-217-229>

16. Бусурманкулов А.Б. Развитие научных идей академика Н.Г. Андреева // Сборник научных трудов к 100-летию со дня рождения Н. Г. Андреева / гл. ред. В.А. Тюльдюков. М.: Великолукская городская типография, 2000. С. 237-243.

17. Гаврилин И.И., Шигапов А.Н. Патент 2581671 РФ. Способ очистки почвы от загрязнения нефтью и нефтепродуктами. № 2014135129/13. 2016.

18. Гражданский кодекс Российской Федерации. Ст. 1354. URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5142/?ysclid=lw6a70x3fv234224723](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/?ysclid=lw6a70x3fv234224723) (дата обращения: 14.10.2024).

19. Григориади А.С., Новоселова Е.И., Киреева Н.А. Фиторемедиация как способ очистки и повышения биологической активности нефтезагрязненных почв // Аграрная Россия. №S1. 2009. С.30-31.

20. Григорьева Т.В., Лайков А.В., Несмелов А.А., Колтаков А.И., Ильинская О.Н., Наумова Р.П. Патент 2529948 РФ. Штамм бактерий *Pseudomonas stutzeri* – деструктор нефтяных алифатических и ароматических

углеводородов, стимулятор роста растений и его использование. № 2012139285/10. 2014.

21. Григорьева Т.В., Несмелов А.А., Ильинская О.Н., Наумова Р.П., Мухаметшин И.Р., Смолко А.А. Патент 2464114 РФ. Способ обезвреживания углеводородсодержащих шламов. № 2010121463/13. 2012.

22. Дегтярева И.А., Бабынин Э.В., Сироткин А.С., Яппаров И.А. Биоремедиация почв: методы и подходы / Казань: КНИТУ, 2018. 100 с.

23. Дзюба Е.А. Геохимическая идентификация антропогенной трансформации природной среды на территории Пермского края: дис. канд. геогр. наук: 1.6.21. Пермь, 2022. 235 с.

24. Дзюба Е.А. Геохимические особенности территории Пермского края, сформированные в результате техногенного и посттехногенного воздействия на природную среду // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: сборник материалов Всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 22-23 апреля 2021 г. Пермь: ПГНИУ, 2021. С. 148-154.

25. Дзюба Е.А. Определение местного фонового содержания некоторых макро- и микроэлементов в почвах Пермского края // Географический вестник = Geographical bulletin. 2021. № 1(56). С. 95-108. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-95-108>

26. Дзюба Е.А. Природно-техногенное геохимическое районирование Пермского края // Географический вестник = Geographical bulletin. 2024. № 3(70). С. 139-151. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-3-139-151>

27. Дубровин А.В., Бедин С.А. Патент 2188529 РФ. Способ рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтесодержащими продуктами на севере российской федерации в зонах нефтепромыслов и магистральных нефтепроводов. № 2001119291/13. 2002.

28. Евсина С.Т., Дзюба Е.А. Опыт применения сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в качестве тест-объекта биотестирования и биоиндикации // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 20-21 апреля 2023 г. / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: ПГНИУ, 2023. С. 559-563.

29. Егурицов С.А., Иванов Ю.В., Скрынник Т.В., Севостьянов С.М., Демин Д.В., Данилов О.А. Патент 2620829 РФ. Способ рекультивации разрушенных земель в зоне многолетней мерзлоты. № 2016114053. 2017.

30. Заалишвили В.Б., Бекузарова С.А., Батаев Д.-К.С., Мажиев Х.Н. Патент 2396133 РФ. Способ реабилитации нефтезагрязненных земель. № 2008142997/15. 2010.

31. Заалишвили В.Б., Бекузарова С.А., Мажиев Х.Н., Батаев Д.-К.С., Бурдзиева О.Г., Мажиев К.Х., Мажиева А.Х. Патент 2481162 РФ. Способ мелиорации нефтезагрязненных земель. № 2011117840/13. 2013.

32. Зайнутдинова Э.М., Шамсутдинова Е.А., Ягфарова Г.Г., Мазитова А.К. Фиторемедиация технонарушенных земель // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 6. С. 157-159.

33. Иванова Л.А. Патент 2512171 РФ. Способ биологической рекультивации техногенно-нарушенных земель. № 2012117842/13. 2014.

34. Ившина И.Б., Костарев С.М., Куюкина М.С., Закиевская Л.В. Патент 2193464 РФ. Способ биоремедиации почв и грунтов, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. № 2001130686/13. 2002.

35. Ильинский А.В., Кирейчева Л.В. Патент 2680583 РФ. Способ биологической очистки от нефтепродуктов почв земель сельскохозяйственного. № 2018118389. 2019.

36. Кабинзянова А.О., Дзюба Е.А. Методы биотестирования и биоиндикации для оценки загрязнения почв // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 20-21 апреля 2023 г. / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: ПГНИУ, 2023. С. 304-308.

37. Кабинзянова А.О., Дзюба Е.А. Оценка состояния окружающей среды в районе Полазненского месторождения методом флуктуирующей асимметрии // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Г.А. Воронова, Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 25-27 апреля 2024 г. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 225-230.

38. Кардакова Т.С., Козьминых А.Н., Комоско В.Н., Комоско Г.В., Кузнецов С.М., Подшивалова О.В. Патент 2616398 РФ. Биоремедиант для проведения рекультивации загрязненных нефтью и/или нефтепродуктами почв. № 2015146815. 2017.

39. Киреева Н.А., Водопьянов В.В. Мониторинг растений, используемых для фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Экология и промышленность России. 2007. С.46-47.

40. Киреева Н.А., Тарасенко Е.М., Бакаева М.Д. Детоксикация нефтезагрязненных почв под посевами люцерны (*Medicago sativa* L.) // Агрехимия. № 10. 2004. С. 68-72.

41. Красавин А.П., Катаева И.В., Оборин Г.А., Берников А.В. Патент 2181933 РФ. Способ рекультивации токсичных земель, нарушенных при добыче угля. № 99108939/13. 2002.

42. Красавин А.П., Катаева И.В., Оборин Г.А., Вяткин А.П., Сергеев В.А., Ерушина О.А., Фусс В.А. Патент 2290270 РФ. Способ биологической ремедиации нефтезагрязненных почв. № 2005123931/13. 2006.

43. Кузнецов П.И., Мелихов В.В., Каренгина Т.В., Швагерус П.В., Кузнецова В.И., Мелихова М.В. Патент 2320429 РФ. Способ биологической рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. № 2006145927/13. 2008.

44. Кузнецов П.И., Мелихов В.В., Каренгина Т.В., Швагерус П.В., Кузнецова В.И., Мелихова М.В. Патент 2329633 РФ. Способ биологической рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. № 2006145924/12. 2008.

45. Кузнецов П.И., Мелихов В.В., Кружилин И.П., Мамин В.Ф., Болотин А.Г., Каренгина Т.В., Швагерус П.В., Кузнецова В.И. Патент 2320430 РФ. Способ био-

логической рекультивации переуплотненных почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. № 2006145926/13. 2008.

46. Литвиненко В.И., Трушин В.Г. Патент 1530116 СССР. Способ рекультивации почв, загрязненных нефтью или нефтесодержащими продуктами. № 4391107. 1989.

47. Лифшиц С.Х., Глянцева Ю.С., Чалая О.Н., Зуева И.Н., Ерофеевская Л.А. Патент 2535746 РФ. Способ восстановления нефтезагрязненных почв путем внесения микробно-растительных сообществ. № 2013104437/13. 2014.

48. Максименко А.П. Патент 2294804 РФ. Способ очистки и рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. № 2005112993/13. 2007.

49. Минеральные удобрения. Большая российская энциклопедия URL: <https://bigenc.ru/c/mineral-nye-udobreniia-ed2a24> (дата обращения: 14.10.2024).

50. Муратова А.Ю., Бондаренкова А.Д., Голубев С.Н., Панченко Л.В., Турковская О.В. Патент 2403102 РФ. Способ фиторемедиации грунта, загрязненного углеводородами (варианты). № 2009118275/10. 2010.

51. Муратова А.Ю., Голубев С.Н., Турковская О.В. Патент 2406758 РФ. Штамм бактерий *Sinorhizobium meliloti* p221, деструктор полициклических ароматических углеводородов и стимулятор роста растений для повышения эффективности фиторемедиации. № 2009108374/10. 2010.

52. Назаров А.В., Иларионов С.А., Горелов В.В., Калачникова И.Г., Щукин В.М., Наргович Ю.К., Басов В.Н. Патент 2253209 РФ. Способ биорекультивации нефтезагрязненных почв. № 2003132619/12. 2005.

53. Назаров А.В., Иларионов С.А., Калачникова И.Г. Патент 2249933 РФ. Способ повышения биомассы и выживаемости растений на нефтезагрязненной почве. № 2003113298/12. 2005.

54. Назаров А.В., Иларионов С.А., Сергеев В.А., Калачникова И.Г., Фусс В.А. Патент 2225086 РФ. Способ фиторекультивации нефтезагрязненных почв. № 2002123819/13. 2004.

55. Никифоров А.С., Важенин В.А., Головнев В.В. Патент 2038363 РФ. Способ рекультивации почв, загрязненных нефтью. № 93006341/15. 1995.

56. Одегова Т.Ф., Баландина А.В., Бурлакова Е.М., Злотников К.М., Злотников А.К., Казаков А.В. Патент 2421291 РФ. Способ рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. № 2008130262/10. 2011.

57. Онегова Т.С., Волочков Н.С., Киреева Н.А., Нагуманов Н.С., Жданова Н.В. Патент 2279472 РФ. Способ очистки почвы от нефтяных загрязнений. № 2004119511/13. 2006.

58. Отрошко Д.Н., Шермет В.В., Волченко Н.Н., Самков А.А., Худоков А.А., Карасев С.Г., Карасева Э.В. Патент 2618096 РФ. Способ фиторемедиации почвы, загрязненной углеводородами, и применение штамма микроорганизма *Rhodococcus erythropolis* вкм ас-2017д в качестве стимулятора роста растений. № 2016122777. 2017.

59. Парфенюк В.И., Беляев А.Г., Хаматнуров Р.М. Патент 2009626 РФ. Способ рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтесодержащими продуктами. № 4935166/15. 1994.

60. Патрушева А.А., Дзюба Е.А. Применение биоиндикации для оценки техногенеза на участках нефтепромысла // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 20-21 апреля 2023 г. / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: ПГНИУ, 2023. С. 582-585.

61. Роспатент. Новости. URL: <https://rospatent.gov.ru/news/4science-novyy-besplatnyy-servis-poiska-patentnyh-dokumentov-yandeks-patenty> (дата обращения: 14.10.2024).

62. Роспатент. Общие сведения. URL: <https://rospatent.gov.ru/ru/about> (дата обращения: 14.10.2024).

63. Роспатент платформа. URL: <https://searchplatform.rospatent.gov.ru/> (дата обращения: 14.10.2024).

64. Сатубалдин К.К., Салангина Л.А. Патент 2242300 РФ. Способ рекультивации загрязненных нефтью и нефтепродуктами почв и грунтов. № 2001106295/13. 2004.

65. Сатубалдин К.К., Салангина Л.А. Патент 2243638 РФ. Способ восстановления загрязненных почв, грунтов и. № 2002127139/12. 2005.

66. Севостьянов В.В. Патент 2097401 РФ. Способ биологической рекультивации плодородных земель, загрязненных нефтью совместно с пластовыми водами в степных, лесостепных, полупустынных зонах (варианты). № 95112921/13. 1997.

67. Севостьянов В.В. Патент 2101900 РФ. Способ биологической рекультивации плодородных земель, загрязненных нефтью, в лесостепных, степных, полупустынных зонах (варианты). № 95112785/13. 1998.

68. Севостьянов В.В. Патент 2113093 РФ. Способ биологической рекультивации песчаных земель, загрязненных нефтью в зонах пустынь и полупустынь. № 96100520/13. 1998.

69. Севостьянов В.В. Патент 2113095 РФ. Способ биологической рекультивации песчаных земель, загрязненных нефтью совместно с пластовыми водами. № 96100523/13. 1998.

70. Симагина Н.О. Особенности проявления фитотоксического эффекта в модельных системах // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». 2010. Т. 23(62). № 4. С. 181-187.

71. Симонов В.Э., Дзюба Е.А. Нефтяное загрязнение в геохимическом ландшафте // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 20-21 апреля 2023 г. / под ред. С.А. Бузмакова. Пермь: ПГНИУ, 2023. С. 594-597.

72. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297-312.

73. Тутова Л.А., Дзюба Е.А. Разработка методики по определению фитотоксичности нефти, добываемых на территории Пермского края // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной

конференции молодых ученых, посвященной памяти Г.А. Воронова, Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 20-21 апреля 2023 г. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 598-601.

74. Титова Л.А., Дзюба Е.А. Характеристика нефти Пермского края и методика оценки их фитотоксичности // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной памяти Г.А. Воронова, Н.Ф. Реймерса и Ф.Р. Штильмарка. Пермь, 25-27 апреля 2024 г. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 526-531.

75. Тихановский А.Н. Патент 2599836 РФ. Способ биологической рекультивации нарушенных вечномёрзлых почв. № 2015123192/13. 2016.

76. Толстогой В.И., Лопатин К.И., Чемякин А.Н., Женихов Ю.Н., Суворов В.И., Панов В.В. Патент 2323052 РФ. Способ рекультивации нефтезагрязненных поверхностей торфяных болот. № 2006128427/15. 2008.

77. Третьякова М.С., Беловежец Л.А., Маркова Ю.А. Патент 2744094 РФ. Микробный препарат для защиты растений, произрастающих на нефтезагрязненных почвах. № 2020124773. 2021.

78. Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, березы и осины в Европейской части России // Лесоведение. 1996. № 6.

79. Хотяновская Ю.В., Бузмаков С.А., Кучин Л.С. Геоэкологические закономерности трансформации природной среды при эксплуатации нефтяного месторождения в карстовом районе // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 1(64). С. 127-138. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-1-127-138>

80. Чекакина Е.В., Егоров И.В. Патент 2176164 РФ. Способ биологической ремедиации нефтезагрязненных почв. № 99114351/13. 2001.

81. Чекакина Е.В., Егоров И.В. Патент 2181640 РФ. Способ биологической рекультивации нарушенных земель. № 99114368/13. 1999.

82. Что такое патентный поиск, как он проводится, обзор патентных реестров. URL: <https://ezybrand.ru/blog/patentnyj-poisk-vidy-zadachi-rezultat/> (дата обращения: 14.10.2024),

83. Шарпова И.Э., Маслова С.П., Табаленкова Г.Н., Гарабаджю А.В., Арчегова И.Б., Таскаев А.И. Патент 2440199 РФ. Корневищный способ фиторекультивации почвы от нефти и нефтепродуктов. № 2010123987/13. 2012.

84. Якушева О.И., Наумова Р.П., Самольянов А.А., Кичигин В.П., Галухин В.А., Никонорова В.Н., Аскаргов И.И., Галиев Р.А. Патент 2329200 РФ. Способ переработки шламов очистных сооружений нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. № 2006115820/15. 2008.

85. Янкевич М.И., Хадеева В.В., Мурыгина В.П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра // Биосфера. 2015. № 2. С. 199-208.

86. Buzmakov S., Egorova D., Gatina E. Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region // Journal of Soils and Sediments. 2019. Vol. 19. № 1. P. 38-48. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2025-0>

87. Buzmakov S.A., Khotyanovskaya Yu.V., Andreev D.N., Egorova D.O., Nazarov A.V. Indication of the status of ecosystems in the conditions of oilfield technogenesis // Geographical bulletin. 2018. № 4(47). P. 90-102. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-4-90-102>

88. Dziuba E., Buzmakov S., Khotyanovskaya Yu. Study of geochemical features of soils on the territory of an abandoned coal mining area using geoinformation technologies // Environmental Geochemistry and Health. 2023. Vol. 45. № 12. P. 9135-9155. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01534-7>

89. WIPO/ВОИС – Поиск по национальным патентным фондам и фондам PCT. URL: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf?ref=vc.ru> (дата обращения: 14.10.2024).

## References

1. Baryshenskaya, A., 2015. Study of the Phytoremediation Process of Oil-Contaminated Soils. In: International Scientific and Technical Conference of young Scientists of V.G. Shukhov BSTU: Proceedings of the conference, 1-30 May 2015, Belgorod, Russia. Belgorod, V.G. Shukhov BSTU, pp. 433-436. (in Russian)

2. Bautista, H., Validov, S., and Bagaeva, T., 2016. Phytoremediation of Oil-Contaminated Soils: Isolation of Microorganisms that Effectively Colonize Plants. In: Scientific and Industrial Activity is a Means of Shaping the Human Environment: Proceedings of the All-Russian Youth Scientific and Practical Conference, 26-27 April 2016, Tyumen, Russia. Tyumen: TIU, pp. 46-48. (in Russian)

3. Bekuzarova, S., Aleksandrov, E., Vajsfel'd, L., Eiges, N. and Pliev, I., 2015. Patent 2555595 RF. Sposob vosproizvodstva neftezagryaznennyh zemel' [Method of reproduction of oil-contaminated lands]. № 2014109977/13. (in Russian)

4. Beljuchenko, I., Dobrydnev, E., Murav'ev, E., Mel'nik, O. and Tereschenko, E., 2010. Patent 2402079 RF. Sposob rekul'tivatsii pochv, zagryaznennyh nef'tju [The method of reclamation of soils contaminated with oil]. № 2008133094/10. (in Russian)

5. Berkovich, Ja. and Validov, Sh., 2020. Patent 2735870 RF. Sposob vydelenija mikroorganizmov dlja ochistki i vosstanovlenija neftezagryaznennyh pochv i gruntov metodom fitobioremediatsii [A method for isolating microorganisms for cleaning and restoring oil-contaminated soils and soils by phytobioremediation]. № 2019132927. (in Russian)

6. Bishimbaev, V., Isaeva, A., Myrhal'kov, Zh., Uspabaeva, A. and Tleukeeva, A., 2016. Patent 31054 Kazakhstan. Sposob biologicheskoy ochistki pochv ot nef'ti i nefteproduktov [A method for biological purification of soils from oil and petroleum products]. № 2015/0415.1. (in Russian)

7. Bogomjagkova, E. and Dzjuba, E., 2024. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlja `EVM № 2024666392 RF. Programma dlja rascheta dopustimoy kontsentratsii nefteproduktov v pochvah [Certificate of state registration of the computer program No. 2024666392 of the Russian Federation. A program for calculating the permissible concentration of petroleum products in soils]. № 2024665931. (in Russian)

8. Boronnikov, V., Shehovtsov, P. and Shehovtsov, V., 1996. Patent 2066944 RF. Sposob uskorennoj rekul'tivatsii pochvy, zagrijaznennoj nefteproduktami [A method for accelerated reclamation of soil contaminated with petroleum products]. № 94043529/13. (in Russian)
9. Buzmakov, S., Andreev, D. and Dzijuba, E., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021620097 RF. Geoinformatsionnaja baza dannyh «Migratsija uglevodorodov v vodoohrannoju zone Kamskogo vodohranil'scha» [Certificate of state registration of the database No. 2021620097 of the Russian Federation. Geoinformation database "Migration of hydrocarbons in the water protection zone of the Kama reservoir"]. № 2020622892. (in Russian)
10. Buzmakov, S., Dzijuba, E. and Sivkov, D., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021620098 RF. Geoinformatsionnaja baza dannyh geohimicheskikh svojstv pochv landshaftnogo zakaznika Predural'e [Certificate of state registration of the database No. 2021620098 of the Russian Federation. Geoinformation database of geochemical properties of soils of the Preduralie landscape reserve]. № 2020622893. (in Russian)
11. Buzmakov, S., Dzijuba, E. and Sivkov, D., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021620099 RF. Geoinformatsionnaja Baza dannyh geohimicheskikh svojstv pochv na territorii Permskogo kraja [Certificate of state registration of the database No. 2021620099 of the Russian Federation. Geoinformation database of geochemical properties of soils in the Perm territory]. № 2020622894. (in Russian)
12. Buzmakov, S., Hotjanovskaja, Ju. and Andreev, D., 2021. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii bazy dannyh № 2021621102 RF. Tehnogennaja transformatsija prirodnoj sredy v karstovom rajone [Certificate of state registration of the database No. 2021621102 of the Russian Federation. Technogenic transformation of the natural environment in the karst area]. № 2021620770. (in Russian)
13. Buzmakov, S., Andreev, D., Nazarov, A., Dzyuba, E., Shestakov, I., Kuyukina, M., Elkin, A., Egorova, D. and Khotyanovskaya, Yu., 2021. Reaction of various test objects to experimental oil pollution of soils. *Ecology*. (4). pp. 254-262. <https://doi.org/10.31857/S0367059721040053> (in Russian)
14. Buzmakov, S. and Dzyuba, E., 2023. Assessment of soil pollution by potentially toxic elements in the zone of influence of potash salt extraction. *Ecology and industry of Russia*, 27(5), pp. 46-50. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-5-46-50> (in Russian)
15. Buzmakov, S., Egorova, D. and Gatina, E., 2017. Dose-effect of oil pollution of soils on the biotic component of ecosystems. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*, 25(2), pp. 217-229. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2017-25-2-217-229> (in Russian)
16. Busurmankulov, A., 2000. *The Development of Scientific Ideas of Academician N.G. Andreev*. In: Tyuldyukov, M. (ed.) *Collection of Scientific Papers on the 100th Anniversary of the Birth of N.G. Andreev, 2000, Moscow, Russia*. Moscow, pp. 237-243. (in Russian)
17. Gavrilin, I. and Shigapov, A., 2016. Patent 2581671 RF. Sposob oshistki pochvy ot zagrijaznenija neft'ju i nefteproduktami [Method of cleaning soil from pollution by oil and oil products]. № 2014135129/13. (in Russian)
18. The Civil Code of the Russian Federation. Article 1354. Available from: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5142/?ysclid=lw6a70x3fv234224723](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5142/?ysclid=lw6a70x3fv234224723) [Accessed 14th October 2024].
19. Grigoriadi, A., Novoselova, E. and Kireeva, N., 2009. Fitoremediatsija kak sposob oshistki i povyshenija biologicheskoj aktivnosti neftezagrijaznennyh pochv [Phytoremediation as a method of purification and enhancement of biological activity of oil-contaminated soils]. *Agrarian Russia*. 1, pp. 30-31. (in Russian)
20. Grigor'eva, T., Lajkov, A., Nesmelov, A., Kolpakov, A., Il'inskaja, O. and Naumova, R., 2014. Patent 2529948 RF. *Pseudomonas stutzeri* bacteria strain – decomposer of aliphatic and aromatic petroleum hydrocarbons and plant growth stimulant and use thereof. № 2012139285/10. (in Russian)
21. Grigor'eva, T., Nesmelov, A., Il'inskaja, O., Naumova, R., Muhametshin, I. and Smolko, A., 2012. Patent 2464114 RF. Sposob obezvrezhivaniya uglevodorodsoderzhaschih shlamov [Method of neutralization of hydrocarbon-containing sludge]. № 2010121463/13. (in Russian)
22. Degtyareva, I., Babynin, E., Sirotkin, A. and Yapparov, I., 2018. *Bioremediatsija pochv: metody i podhody* [Bioremediation of soils: methods and approaches]. Kazan: KNITU publ. 100 p.
23. Dzyuba, E., 2022. *Geohimicheskaja identifikatsija antropogennoj transformatsii prirodnoj sredy na territorii Permskogo kraja* [Geochemical identification of anthropogenic transformation of the natural environment on the territory of the Perm territory]. Candidate's Dissertation of Sciences in Geography. Perm, 235 p.
24. Dzyuba, E., 2021. *Geochemical Features of the Territory of Perm Region Formed as a Result of Technogenic and Post-Technogenic Impact on the Environment*. In: *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of Nature: Proceedings of All-Russian School-Seminar Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark, 22-23 April 2021, Perm, Russia*. Perm State University, 2021, pp. 148-154. (in Russian)
25. Dzyuba, E., 2021. Determination of the local background content of some macro- and microelements in the soils of the Perm region. *Geographical Bulletin*, 1(56), pp. 95-108. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2021-1-95-108> (in Russian)
26. Dzyuba, E., 2024. Natural and technogenic geochemical zoning of the Perm region. *Geographical Bulletin*, 3(70), pp. 139-151. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2024-3-139-151> (in Russian)
27. Dubrovin, A. and Bedin, S.A., 2002. Patent 2188529 RF. Sposob rekul'tivatsii pochv, zagrijaznennyh neft'ju i neftesoderzhaschimi produktami na severe rossijskoj federatsii v zonah neftepromyslov i magistral'nyh nefteprovodov [A method for recultivation of soils contaminated with oil and oil-containing products in the north of the Russian Federation in the zones of oil fields and main oil pipelines]. № 2001119291/13. (in Russian)
28. Evsina, S. and Dzyuba, E., 2023. *The Experience of Using Scots pine (Pinus sylvestris L.) as a Test Object of Biotesting and Bioindication*. In: Buzmakov, S. (ed.) *Perm. Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of Nature: Proceedings of All-Russian Scientific Conference of Young Scientists Dedicated to the*

Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark. 20-21 April 2023, Perm, Russia. Perm, Perm State University, pp. 559-563. (in Russian)

29. Egurtsov, S., Ivanov, Ju., Skrynnik, T., Sevost'janov, S., Demin, D. and Danilov, O., 2017. Patent 2620829 RF. Sposob rekul'tivatsii razrushennyh zemel' v zone mnogoletnej [The method of reclamation of destroyed lands in the long-term zone]. № 2016114053. (in Russian)

30. Zaalishvili, V., Bekuzarova, S., Bataev, D. and Mazhiev, H., 2010. Patent 2396133 RF. Sposob reabilitatsii neftezagrnennyyh zemel' [The method of rehabilitation of oil-contaminated lands]. № 2008142997/15. (in Russian)

31. Zaalishvili, V., Bekuzarova, S., Mazhiev, H., Bataev, D., Burdzieva, O., Mazhiev, K. and Mazhieva, A., 2013. Patent 2481162 RF. Sposob melioratsii neftezagrnennyyh zemel' [The method of reclamation of oil-contaminated lands]. № 2011117840/13. (in Russian)

32. Zainutdinova, E., Shamsutdinova, E., Yagafarova, G. and Mazitova, A.K., 2017. Fitoremediatsiya tehnonarushennyh zemel' [Phytoremediation of technodisturbed lands]. *Bulletin of the Technological University*, 20(6), pp. 157-159. (in Russian)

33. Ivanova, L., 2014. Patent 2512171 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii tehnogenno-narushennyh zemel' [A method of biological reclamation of technogenically disturbed lands]. № 2012117842/13. (in Russian)

34. Ivshina, I., Kostarev, S., Kujukina, M. and Zaksheskaja, L., 2002. Patent 2193464 RF. Sposob bioremediatsii pochv i gruntov, zagrnennyyh nef'tju i nefteproduktami [Method of bioremediation of soils and soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2001130686/13. (in Russian)

35. Il'inskij, A. and Kirejecheva, L., 2019. Patent 2680583 RF. Sposob biologicheskoy ochistki ot nefteproduktov pochv zemel' sel'skhozajstvennogo [A method of biological purification from petroleum products of soils of agricultural lands]. № 2018118389. (in Russian)

36. Kabipzyanova, A. and Dzyuba, E., 2023. *Methods of Biotesting and Bioindication for Soil Pollution Assessment*. In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of Nature: Proceedings of All-Russian Scientific Conference of young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark*. 20-21 April 2023, Perm, Russia. Perm, Perm State University, pp. 304-308. (in Russian)

37. Kabipzyanova, A. and Dzyuba, E., 2024. *Assessment of the State of the Environment in the Area of the Poroshenskoye Deposit by the Method of Fluctuating Asymmetry*. In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of Nature: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference of young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark*. 25-27 April 2024, Perm, Russia. Perm, Perm State University, pp. 225-230. (in Russian)

38. Kardakova, T., Koz'minyh, A., Komosko, V., Komosko, G., Kuznetsov, S. and Podshivalova, O., 2017. Patent 2616398 RF. Bioremediant dlja provedeniya rekul'tivatsii zagrnennyyh nef'tju i/ili nefteproduktami pochv [Bioremediant for reclamation of soils contaminated with oil and/or petroleum products]. № 2015146815. (in Russian)

39. Kireeva, N. and Vodopyanov, V., 2007. Monitoring rastenij, ispol'zuemyh dlja fitoremediatsii neftezagrnennyyh pochv [Monitoring of plants used for phytoremediation of oil-contaminated soils]. *Ecology and industry of Russia*, 9, pp.46-47. (in Russian)

40. Kireeva, N., Tarasenko, E. and Bakaeva, M., 2004. Detoksikatsiya neftezagrnennyyh pochv pod posevami ljutserny (*Medicago sativa L.*) [Detoxification of oil-contaminated soils under alfalfa crops (*Medicago sativa L.*)]. *Agrochemistry*, 10, pp. 68-72. (in Russian)

41. Krasavin, A., Kataeva, I., Oborin, G. and Bernikov, A., 2002. Patent 2181933 RF. Sposob rekul'tivatsii toksichnyh zemel', narushennyh pri dobyche uglja [The method of reclamation of toxic lands disturbed during coal mining]. № 99108939/13. (in Russian)

42. Krasavin, A., Kataeva, I., Oborin, G., Vjatkin, A., Sergeev, V., Erushina, O. and Fuss, V., 2006. Patent 2290270 RF. Sposob biologicheskoy remediatsii neftezagrnennyyh pochv [Method of biological remediation of oil-contaminated soils]. № 2005123931/13. (in Russian)

43. Kuznetsov, P., Melihov, V., Karengina, T., Shvagerus, P., Kuznetsova, V. and Melihova, M., 2008. Patent 2320429 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii pochv, zagrnennyyh nef'tju i nefteproduktami [A method of biological reclamation of soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2006145927/13. (in Russian)

44. Kuznetsov, P., Melihov, V., Karengina, T., Shvagerus, P., Kuznetsova, V. and Melihova, M., 2008. Patent 2329633 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii pochv, zagrnennyyh nef'tju i nefteproduktami [A method of biological reclamation of soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2006145924/12. (in Russian)

45. Kuznetsov, P., Melihov, V., Kruzhilin, I., Mamin, V., Bolotin, A., Karengina, T., Shvagerus, P. and Kuznetsova, V., 2008. Patent 2320430 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii pereuplotnennyh pochv, zagrnennyyh nef'tju i nefteproduktami [A method of biological reclamation of over-compacted soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2006145926/13. (in Russian)

46. Litvinenko, V. and Trushin, V., 1989. Patent 1530116 USSR. Sposob rekul'tivatsii pochv, zagrnennyyh nef'tju ili neftesoderzhaschimi produktami [Method of reclamation of soils contaminated with oil or oil-containing products]. № 4391107. (in Russian)

47. Lifshits, S., Gljaznetsova, Ju., Chalaja, O., Zueva, I. and Erofeevskaja, L., 2014. Patent 2535746 RF. Sposob vosstanovlenija neftezagrnennyyh pochv putem vneshenija mikrobnorastitel'nyh soobshchestv [A method for restoring oil-contaminated soils by introducing microbial and plant communities]. № 2013104437/13. (in Russian)

48. Maksimenko, A., 2007. Patent 2294804 RF. Sposob ochistki i rekul'tivatsii pochv, zagrnennyyh nef'tju i nefteproduktami [A method for cleaning and recultivation of soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2005112993/13. (in Russian)

49. Mineral fertilizers. The Great Russian Encyclopedia. Available from: <https://bigenc.ru/c/mineral-nye-udobrenija-ed2a24> [Accessed 14th October 2024].

50. Muratova, A.J., Bondarenkova, A., Golubev, S., Panchenko, L. and Turkovskaja, O., 2010. Patent 2403102 RF. Sposob fitoremediatsii grunta, zagrnennogo uglevodородami (varianty) [Method of phytoremediation of soil

- contaminated with hydrocarbons (options)]. № 2009118275/10. (in Russian)
51. Muratova, A., Golubev, S. and Turkovskaja, O., 2010. Patent 2406758 RF. Shtamm bakterij *Sinorhizobium meliloti* p221, destruktorskiy politsiklicheskih aromatičeskikh uglevodorodov i stimulyator rosta rastenij dlja povyshenija `effektivnosti fitoremediatsii [Bacterial strain *Sinorhizobium meliloti* p221, a destructor of polycyclic aromatic hydrocarbons and a plant growth stimulator to increase the effectiveness of phytoremediation]. № 2009108374/10. (in Russian)
52. Nazarov, A., Ilarionov, S., Gorelov, V., Kalachnikova, I., Schukin, V., Nargovich, Ju. and Basov, V., 2005. Patent 2253209 RF. Sposob biorekul'tivatsii neftezagrzjzennykh pochv [Method of biorecultivation of oil-contaminated soils]. № 2003132619/12. (in Russian)
53. Nazarov, A., Ilarionov, S. and Kalachnikova, I., 2005. Patent 2249933 RF. Sposob povyshenija biomassy i vyzhivaemosti rastenij na neftezagrzjzennoj pochve [A method for increasing biomass and plant survival in oil-contaminated soil]. № 2003113298/12. (in Russian)
54. Nazarov, A., Ilarionov, S., Sergeev, V., Kalachnikova, I. and Fuss, V., 2004. Patent 2225086 RF. Sposob fitorekul'tivatsii neftezagrzjzennykh pochv [Method of phytorecultivation of oil-contaminated soils]. № 2002123819/13. (in Russian)
55. Nikiforov, A., Vazhenin, V. and Golovnev, V., 1995. Patent 2038363 RF. Sposob rekul'tivatsii pochv, zagrzjzennykh nef'tju [The method of reclamation of soils contaminated with oil]. № 93006341/15. (in Russian)
56. Odegova, T., Balandina, A., Burlakova, E., Zlotnikov, K., Zlotnikov, A. and Kazakov, A., 2011. Patent 2421291 RF. Sposob rekul'tivatsii pochv, zagrzjzennykh nef'tju i nefteproduktami [The method of reclamation of soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2008130262/10. (in Russian)
57. Onegova, T., Volochkov, N., Kireeva, N., Nagumanov, N. and Zhdanova, N., 2006. Patent 2279472 RF. Sposob ochistki pochvy ot nef'tjanykh zagrzjznenij [A method for cleaning the soil from oil pollution]. № 2004119511/13. (in Russian)
58. Otroshko, D., Sheremet, V., Volchenko, N., Samkov, A., Hudokormov, A., Karasev, S. and Karaseva, E., 2017. Patent 2618096 RF. Sposob fitoremediatsii pochvy, zagrzjzennoj uglevodorodami, i primenenie shtamma mikroorganizma *Rhodococcus erythropolis* vkm as-2017d v kachestve stimulyatora rosta rastenij [A method for phytoremediation of soil contaminated with hydrocarbons and the use of a strain of the microorganism *Rhodococcus erythropolis* vkm ac-2017d as a plant growth stimulator]. № 2016122777. (in Russian)
59. Parfenjuk, V., Beljaev, A. and Hamaturov, R., 1994. Patent 2009626 RF. Sposob rekul'tivatsii pochv, zagrzjzennykh nef'tju i neftesoderzhaschimi produktami [A method of reclamation of soils contaminated with oil and oil-containing products.]. № 4935166/15. (in Russian)
60. Patrusheva, A. and Dzyuba, E., 2023. Application of Bioindication to Assess Technogenesis in Oilfield Sites. In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of Nature: Proceedings of All-Russian Scientific Conference of young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark*. 20-21 April 2023, Perm, Russia. Perm, Perm State National University, pp. 582-585. (in Russian)
61. Rospatent. News. Available from: <https://rospatent.gov.ru/ru/news/4science-novyy-besplatnyy-servis-poiska-patentnyh-dokumentov-yandeks-patenty> [Accessed 14th October 2024].
62. Rospatent. General information. Available from: <https://rospatent.gov.ru/ru/about> [Accessed 14th October 2024].
63. Rospatent platform. Available from: <https://search-platform.rospatent.gov.ru/> [Accessed 14th October 2024].
64. Satubaldin K. and Salanginas L., 2004. Patent 2242300 RF. Sposob rekul'tivatsii zagrzjzennykh nef'tju i nefteproduktami pochv i gruntov [The method of reclamation of soils and soils contaminated with oil and petroleum products]. № 2001106295/13. (in Russian)
65. Satubaldin, K. and Salanginas, L., 2005. Patent 2243638 RF. Sposob vosstanovlenija zagrzjzennykh pochv, gruntov i wod [A method for restoring polluted soils, soils and waters]. № 2002127139/12. (in Russian)
66. Sevost'janov, V., 1997. Patent 2097401 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii plodorodnykh zemel', zagrzjzennykh nef'tju sovmestno s plastovymi vodami v stepnykh, lesostepnykh, polupustynnykh zonah (varianty) [A method of biological reclamation of fertile lands contaminated with oil together with reservoir waters in steppe, forest-steppe, semi-desert zones (options)]. № 95112921/13. (in Russian)
67. Sevost'janov, V., 1998. Patent 2101900 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii plodorodnykh zemel', zagrzjzennykh nef'tju, v lesostepnykh, stepnykh, polupustynnykh zonah (varianty) [Method of biological reclamation of fertile lands contaminated with oil in forest-steppe, steppe, semi-desert zones (options)]. № 95112785/13. (in Russian)
68. Sevost'janov, V., 1998. Patent 2113093 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii peschanykh zemel', zagrzjzennykh nef'tju v zonah pustyn' i polupustyn' [A method of biological reclamation of sandy lands contaminated with oil in desert and semi-desert zones]. № 96100520/13. (in Russian)
69. Sevost'janov, V., 1998. Patent 2113095 RF. Sposob biologicheskoy rekul'tivatsii peschanykh zemel', zagrzjzennykh nef'tju sovmestno s plastovymi vodami [A method of biological reclamation of sandy lands contaminated with oil together with reservoir waters]. № 96100523/13. (in Russian)
70. Simagina, N., 2010. Osobennosti proyavlenija fitotoksicheskogo `effekta v model'nykh sistemah [Features of the phytotoxic effect in model systems]. *Scientific notes of the Tauride National University named after V.I. Vernadsky. The series "Biology, chemistry"*. 23(62), pp. 181-187. (in Russian)
71. Simonov, V. and Dzyuba, E., 2023. Oil Pollution in the Geochemical Landscape. In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of the Nature: Proceedings of All-Russian Scientific Conference of young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark*. 20-21 April 2023, Perm, Russia. Perm, Perm State University, pp. 594-597. (in Russian)

72. Sozina, I. and Danilov, A., 2023. Mikrobiologičeskaja remediatsija neftezagrjazennyh pochv [Microbiological remediation of oil-contaminated soils]. *Notes of the Mining Institute*, 260, pp. 297-312. (in Russian)
73. Titova, L. and Dzyuba, E., 2023. Development of a Methodology for Determining the Phytotoxicity of Oil Produced in the Perm territory. In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of The Natural Environment: Proceedings of All-Russian Scientific Conference of Young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark. 20-21 April 2023, Perm, Russia. Perm, Perm State University*, pp. 598-601. (in Russian)
74. Titova, L. and Dzyuba, E., 2024. Characteristics of the Oil Products of the Perm region and Methods for Assessing their Phytotoxicity In: Buzmakov, S. (ed.) *Environmental Safety in Conditions of Anthropogenic Transformation of the Natural Environment: Proceedings of All-Russian Scientific Conference of young Scientists Dedicated to the Memory of N.F. Reimers and F.R. Shtilmark. 25-27 April 2024, Perm, Russia. Perm, Perm State University*, pp. 526-531. (in Russian)
75. Tihanovskij, A., 2016. Patent 2599836 RF. Sposob biologičeskoj rekul'tivatsii narushennyh vechnomerzlyh pochv [A method of biological reclamation of disturbed permafrost soils]. № 2015123192/13. (in Russian)
76. Tolstograj, V., Lopatin, K., Chemjakin, A., Zhenihov, Ju., Suvorov, V. and Panov, V., 2008. Patent 2323052 RF. Sposob rekul'tivatsii neftezagrjazennyh poverhnošej torfjanyh bolot [Method of reclamation of oil-contaminated surfaces of peat bogs]. № 2006128427/15. (in Russian)
77. Tret'jakova, M., Belovezhets, L. and Markova, Ju., 2021. Patent 2744094 RF. Mikrobnij preparat dlja zaschity rastenij, proizrastajuschih na neftezagrjazennyh [Microbial preparation for the protection of plants growing in oil-contaminated areas]. № 2020124773. (in Russian)
78. Utkin, A., Zamolodchikov, D., Gulbe, T. and Gulbe, Ya., 1996. Allometricheskie uravnenija dlja fitomassy po dannym derev'ev sosny, eli, berezy i osiny v Evropejskoj chasti Rossii [Allometric equations for phytomass according to pine, spruce, birch and aspen trees in the European part of Russia]. *Forest science*, 6, pp. 36-46. (in Russian)
79. Khotyanovskaya, Yu., Buzmakov, S. and Kuchin, L., 2023. Geoecological patterns of transformation of the natural environment during the operation of an oil field in the karst region. *Geographical Bulletin*, 1(64), pp. 127-138. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2023-1-127-138> (in Russian)
80. Chekasina, E. and Egorov, I., 2001. Patent 2176164 RF. Sposob biologičeskoj remediatsii neftezagrjazennyh pochv [Method of biological remediation of oil-contaminated soils]. № 99114351/13. (in Russian)
81. Chekasina, E. and Egorov, I., 1999. Patent 2181640 Rossijskaja Federatsija. Sposob biologičeskoj rekul'tivatsii narushennyh zemel' [A method of biological reclamation of disturbed lands]. № 99114368/13. (in Russian)
82. What is a patent search, how is it conducted, a review of patent registries. Available from: <https://ezybrand.ru/blog/patentnyj-poisk-vidy-zadachi-rezultat/> [Accessed 14th October 2024].
83. Sharapova, I., Maslova, S., Tabalenkova, G., Garabadzhiu, A., Archegova, I. and Taskaev, A., 2012. Patent 2440199 RF. Kornevischnyj sposob fitorekul'tivatsii pochvy ot nefti i nefteproduktov [Rhizomatous method of phytorecultivation of soil from oil and petroleum products]. № 2010123987/13. (in Russian)
84. Jakusheva, O., Naumova, R., Samol'janov, A., Kichigin, V., Galuhin, V., Nikonorova, V., Askarov, I. and Galiev, R., 2008. Patent 2329200 RF. Sposob pererabotki shlamov ochistnyh sooruzhenij neftehimicheskij i neftepererabatyvajuschih proizvodstv [A method for processing sludge from treatment plants of petrochemical and oil refining industries]. № 2006115820/15. (in Russian)
85. Yankevich, M., Khadeeva, V. and Murygina, V., 2015. Bioremediatsija pochv: vchera, segodnja, zavtra [Bioremediation of soils: yesterday, today, tomorrow]. *Biosphere*, 2, pp. 199-208. (in Russian)
86. Buzmakov, S., Egorova, D. and Gatina, E., 2019. Effects of crude oil contamination on soils of the Ural region. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1), pp. 38-48. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2025-0>
87. Buzmakov, S., Khotyanovskaya, Yu., Andreev, D., Egorova, D. and Nazarov, A.V., 2018. Indication of the status of ecosystems in the conditions of oilfield technogenesis. *Geographical bulletin*, 4(47), pp. 90-102. <https://doi.org/10.17072/2079-7877-2018-4-90-102>
88. Dziuba, E., Buzmakov, S. and Khotyanovskaya, Yu., 2023. Study of geochemical features of soils on the territory of an abandoned coal mining area using geoinformation technologies. *Environmental Geochemistry and Health*, 45(12), pp. 9135-9155. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01534-7>
89. WIPO/WIPO – Search for national patent funds and PCT Available from: <https://patentscope.wipo.int/search/ru/search.jsf?ref=vc.ru> [Accessed 14th October 2024].

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 07.11.2024; принята к публикации 19.11.2024.

The article was submitted 05.11.2024; approved after reviewing 07.11.2024; accepted for publication 19.11.2024.

## РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Оригинальная научная (исследовательская) статья

 УДК 543.31.51:[675.088.3+504.45](282.256.341)

 <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>

 EDN ZWQKER

**Загрязнение реки Тья и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Северобайкальска: оценка геохимическим методом**

Евгений Павлович Чебыкин<sup>1</sup>, Наталья Николаевна Куликова<sup>2</sup>, Елена Валентиновна Лихошвай<sup>3</sup>, Александр Николаевич Сутурин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия

<sup>1</sup> [epcheb@yandex.ru](mailto:epcheb@yandex.ru)

<sup>2</sup> [kulikova@lin.irk.ru](mailto:kulikova@lin.irk.ru)

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

<sup>4</sup> [san@lin.irk.ru](mailto:san@lin.irk.ru)

**Аннотация.** Методом ИСП-МС изучен химический элементный состав р. Тья, впадающие в нее сточные воды канализационных очистных сооружений (КОС) г. Северобайкальска и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния загрязненных речных вод. Установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Северобайкальска в общий речной сток р. Тья очень мал (~0,04%) вследствие большой водности самой реки, однако геохимические вклады по отдельным элементам довольно значительные (Cl – 29%, P – 7,3%, Na – 4,2%, Zn – 2,7%). Влияние загрязненных вод р. Тья на прилегающую литораль Байкала ограничено сектором 200-300 м от уреза во фронтальном направлении (водные вклады речных вод составляют 26-4%), однако в прибрежной зоне распространяется за пределы дельты. Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Северобайкальска подвергается р. Тья и прибрежная вода в литорали Байкала в 550 м вправо от устья основной протоки, где водный вклад речных вод максимальный (86%). В этих объектах суммарный геохимический вклад (СГХВ) сточных вод, рассчитанный по 41 информативному химическому элементу, составляет 53 и 35% соответственно. На остальных станциях в литорали Байкала в прибрежной зоне СГХВ небольшой и составляет 2,8-7,5%. В секторе 200-300 м от уреза СГХВ сопоставим с прибрежной зоной и составляет 1,5-8,1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза СГХВ минимальный – 0,07-0,21%. В сточных водах КОС г. Северобайкальска обнаружено превышение нормативов по P (69 ПДК), Mn (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Mo (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК).

**Ключевые слова:** сточные воды, химические элементы, ИСП-МС, предельно допустимые концентрации, озеро Байкал

**Благодарности:** команде и капитану И.Ю. Бархокову НИС «Г.Ю. Верещагин» за помощь в отборе проб.

**Финансирование:** работа выполнена по государственному заданию ЛИИ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 121032300186-9).

**Для цитирования:** Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение реки Тья и поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений г. Северобайкальска: оценка геохимическим методом // Антропогенная трансформация природной среды. 2024. Т. 10. № 2. С. 82-102. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>. EDN ZWQKER.

## SECTION 2. POLLUTION

Original Paper

**Pollution of Tyaa River and Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Severobaikalsk Town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method**

Eugene P. Chebykin<sup>1</sup>, Natalya N. Kulikova<sup>2</sup>, Yelena V. Likhoshway<sup>3</sup>, Alexander N. Suturin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Limnological Institute of RAS SB, Irkutsk, Russia

<sup>1</sup> [epcheb@yandex.ru](mailto:epcheb@yandex.ru)

<sup>2</sup> [kulikova@lin.irk.ru](mailto:kulikova@lin.irk.ru)

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

<sup>4</sup> [san@lin.irk.ru](mailto:san@lin.irk.ru)

**Abstract.** The composition of chemical elements from the Tyua River, wastewater from water treatment facilities (WTF) in Severobaikalsk town and from surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of polluted riverine waters were studied using the ICP-MS method. It is found out that water fraction of WTF waste waters from Severobaikalsk town into total riverine drainage of the Tyua R. is very low (~0.04%) due to a great water content of the river itself. However, geochemical contributions by several elements are rather considerable (Cl – 29%, P – 7,3%, Na – 4,2%, Zn – 2,7%). The influence of the Tyua R. polluted waters onto the adjacent littoral of Lake Baikal is limited by the sector of 200-300 m from water edge in frontal direction (water fractions of riverine waters are 26-4%), however, in the coastal zone it extends out of the delta. Among the studied objects, maximal geochemical effect of WTF waste waters from Severobaikalsk town concerns the Tyua R. and coastal water in Lake Baikal littoral in 550 m rightward from the mouth of main duct, where water fraction of riverine waters is maximal (86%). In these objects, Summary Geochemical Fraction (SGCF) of waste waters calculated by 41 informative chemical elements was 53 and 35%, respectively. At other stations in Lake Baikal littoral in the coastal zone, SGCF is not great – 2.8-7.5%. In the sector of 200-300 m from water edge, SGCF is comparable with the coastal zone – 1.5-8.1%. In the sectors of 500-600 and 800 m from the water edge, SGCF is minimal – 0.07-0.21%. In WTF waste waters from Severobaikalsk town, exceeding of regulations by P (69 MAC), Mn (6 MAC), Zn (3.4 MAC), Cu (2.1 MAC), Mo (1.7 MAC) and V (1.3 MAC) was detected

**Keywords:** waste waters, chemical elements, ICP-MS, maximal allowable concentrations, Lake Baikal

**Acknowledgments:** the authors thank R/V “Vereshchagin” team and captain I.Yu. Barkhokov for their help in sampling.

**Funding:** The study was carried out under the state assignment of Limnological Institute of SB RAS with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 121032300186-9).

**For citation:** Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Y. and Sutorin, A., 2024. Pollution of Tyua River and Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Severobaikalsk Town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method. *Anthropogenic Transformation of Nature*, 10(2), pp. 82-102. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2024-2-82-102>. EDN ZWQKER. (in Russian)

## Введение

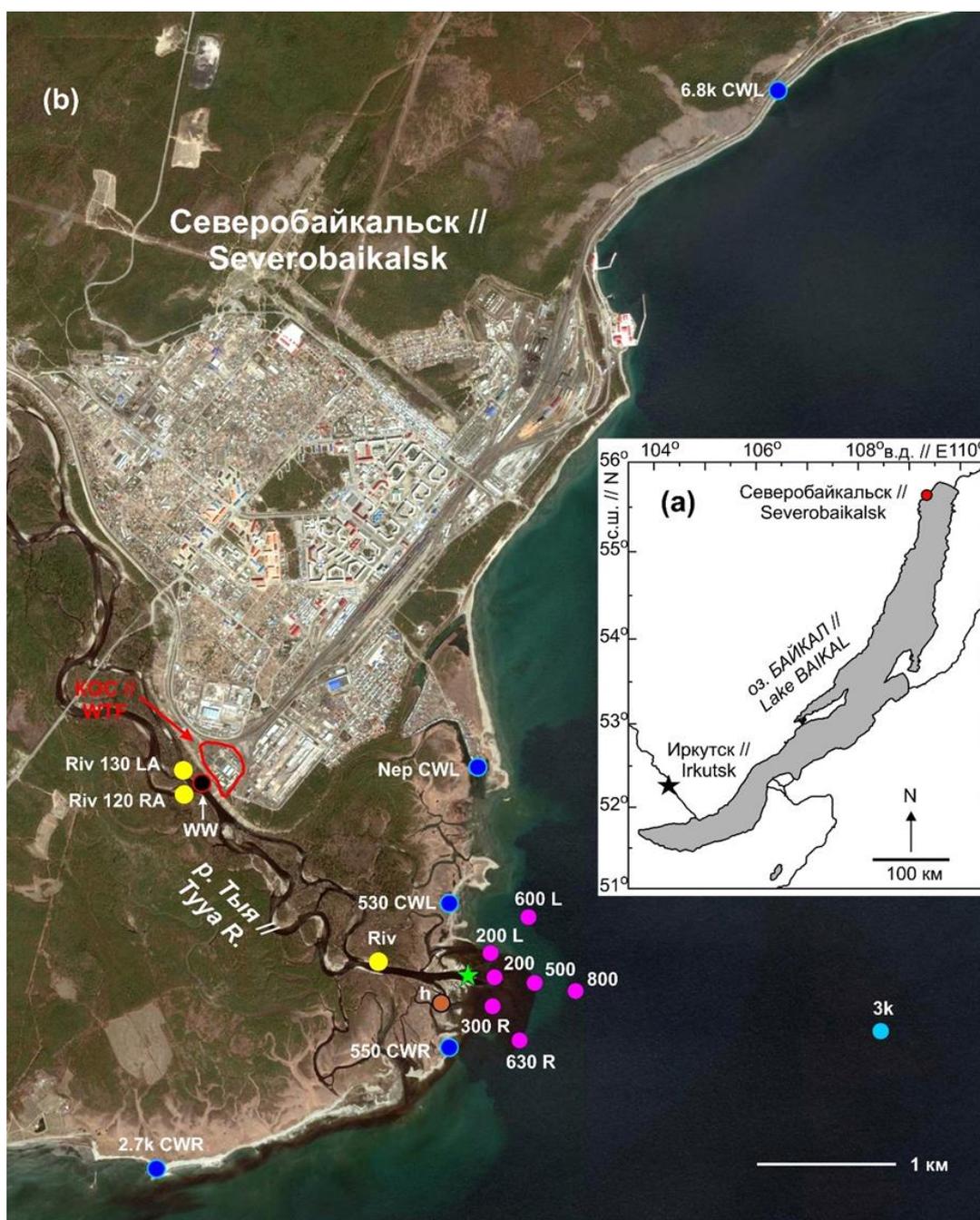
На побережье Байкала в последние годы активно проявляется экологический кризис: в литоральной зоне бурно развиваются нитчатые водоросли рода *Spirogyra*, гибнут эндемичные байкальские губки, водные лишайники и другие гидробионты [3, 8, 11, 21]. Приуроченность интенсивных кризисных проявлений к местам хозяйственной деятельности человека и развития туристического бизнеса указывает на антропогенное влияние, которое может быть, как непосредственной причиной кризиса, так и косвенно влиять на его развитие при неблагоприятных природно-климатических условиях. В связи с этим актуален расширенный и детальный поиск неблагоприятных факторов и оценка степени их влияния на литоральную зону Байкала.

В предыдущей нашей работе [13] дан обзор литературы по некоторым неблагополучным участкам Байкальской природной территории (БПТ) и существующим методам оценки степени воздействия сточных вод различного генезиса на загрязняемые объекты. В той же работе [13] нами был предложен новый, геохимический метод, для количественной оценки водных и геохимических вкладов локальных источников загрязнения в последовательно загрязняемые водные объекты (стоки-река-озеро) на примере г. Слюдянки, р. Похабиха и прилегающей литорали оз. Байкал. Применимость данного метода обусловлена широким спектром химических элементов, определяемых методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). В последующей работе [14] данный метод получил дальнейшее развитие – был разработан численный метод расчета водных вкладов источников на примере литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод канализационных очистных сооружений (КОС) г. Байкальска. Расчет водных вкладов является

первым этапом разработанного геохимического метода [13] и ведется по нескольким группам контрастных консервативных и условно консервативных химических элементов с помощью итерационных процедур, минимизирующих среднее квадратичное отклонение измеренных концентраций химических элементов в объектах смешения от расчетных. На втором этапе рассчитываются геохимические вклады от источников загрязнения в исследуемых объектах смешения с учетом возможного неконсервативного поведения химических элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах. [13, 14]. Важное преимущество предложенного нами геохимического метода состоит в том, что он позволяет быстро, дешево и надежно определить водные вклады источников на каждом этапе смешения в любых сложных объектах на момент исследования, что невозможно сделать, опираясь на официальные справочные данные и /или при использовании традиционных методов измерения расходов воды (например, при смешении разных типов вод в литорали озера).

Побережье оз. Байкал в зоне влияния р. Тья многие годы испытывает сильный экологический стресс, проявляющийся в самом масштабном развитии нехарактерной для Байкала нитчатой водоросли рода *Spirogyra* и нарушении естественной поясности водных растений, которые прослеживаются на удалении до 20 км от устья [9, 10, 21].

р. Тья – довольно крупный приток Байкала – седьмой по водности после р. Селенга, р. В. Ангара, р. Баргузин, р. Снежная, р. Турка и р. Кичера. Ее длина составляет 120 км, площадь бассейна 2580 км<sup>2</sup>, среднегодовой расход – 39,9 м<sup>3</sup>/с [1]. р. Тья впадает в оз. Байкал на его северо-западном окончании и образует дельту шириной до 2,5 км (рис. 1 / fig. 1).



**Рис. 1. Район исследования и места отбора проб: расположение района исследования относительно Байкальской природной территории (а); и места отбора проб в районе устья р. Тья в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска (б)**

\* **Примечание:** В качестве подложки использован космический снимок из открытого картографического сервиса Yandex. Зеленой звездочкой показано устье основной протоки р. Тья. Желтыми кружками отмечены места отбора речных проб (ст. Riv 130 LA и ст. Riv 120 RA – 130 и 120 м выше трубы сброса КОС, ст. Riv – 650 м выше устья основной протоки), черным – сточных вод (ст WW – труба сброса КОС 2,4 км выше устья основной протоки), синими и розовыми – прибрежная и поверхностная вода в литорали Байкала, соответственно (цифры в названии станций указывают расстояние в метрах (k – километры) от основной протоки), голубым – фоновая станция в 3 км от берега (ст. 3k).

**Fig. 1. Studied areas and sampling sites: position of the studied area relative to Baikal Natural Territory (a) and sampling sites in the Tuuya River mouth area in the influence zone of WTF waste waters from Severobaikalsk town (b)**

\* **Note:** A satellite image from an open cartographic service Yandex is used as a mount. A green asterisk shows the mouth of main duct of the Tuuya R. Yellow circles show sites of collection of riverine samples (st. Riv 130 LA and st. Riv 120 RA – 130 and 120 m upstream the pipe of WTF discharge, st. Riv – 650 m upstream the mouth of main duct), blue and pink ones – coastal and surface water in Lake Baikal littoral, respectively (figures in station names mean distance in meters (k – kilometers) from main duct), light blue one – a background station in 3 km from the coast (st. 3k).

В р. Тья сбрасываются стоки канализационных очистных сооружений г. Северобайкальска (население 21 431 чел., 2023 г. [15]), которые, кроме городских бытовых вод принимают стоки предприятий РЖД (вагонное депо, локомотивное депо, станция очистных сооружений РЖД). Экспертиза КОС г. Северобайкальска и предприятий РЖД, проведенная в 2013 г. сотрудниками Лимнологического института СО РАН совместно с представителями Росприроднадзора и Байкальской транспортной прокуратуры установила, что сточные воды КОС характеризуются неудовлетворительными санитарно-микробиологическими и химическими показателями, значительно превышающими установленные нормативы, что свидетельствует о плохой работе очистных сооружений [10]. Установлено также, что вагонное депо города вместо обычных моющих средств для помывки железнодорожного транспорта стало использовать препараты с сильными бактерицидными веществами (полигексаметиленгуанидин – ПГМ), которые уничтожили «активный ил» городских КОС, являющийся биологическим фильтром очистки стоков от биогенных элементов (P, N). Повышенное поступление биогенов, токсикантов и других загрязнителей с неочищенными и недостаточно очищенными стоками, вероятно, является главным фактором наблюдаемого экологического стресса.

Согласно Приказу Минприроды РФ № 83 [6] в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории (БПТ) нормируется содержание 35 химических элементов: Li, Be, B, Na, Mg, Al, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Te, I, Cs, Ba, W, Hg и Pb. Исследования сточных вод КОС г. Северобайкальска, проведенные нами в 2013 и 2019 гг. показали, что концентрации шести элементов превышают установленные нормативы: P (69-85 ПДК), S (~ 1 ПДК), Mn (4,7-5,9 ПДК), Cu (2,2-2,9 ПДК), Zn (3,4-5,1 ПДК), Mo (1,5-1,6 ПДК), а Na и Cl близки к предельно допустимым (0,7-0,8 ПДК). Из числа рассматриваемых элементов мы исключаем ртуть ввиду ее ненадежного определения методом ИСП-МС.

Цель данного исследования – с помощью геохимического метода оценить степень влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска на р. Тья и поверхностные воды прилегающей литорали оз. Байкал – определить водные и геохимические вклады сточных и загрязненных речных вод, выявить основные контуры рассеяния загрязнителей в литорали.

## 1. Материалы и методы

**1.1. Описание района работ, отбор и фиксация проб.** г. Северобайкальск расположен на левом берегу р. Тья, на побережье северо-западного окончания оз. Байкал (рис. 1 / fig. 1). Сточные воды КОС города сбрасываются непосредственно в р. Тья с левого берега по двум трубам в 2,4 км выше устья по прямой (3,3 км по руслу реки). Ранее (в 2013 и 2019 гг.) и на момент обследования стоки поступали только по одной трубе.

Отбор проб произведен 13 сентября 2022 г. в ходе осенней кругобайкальской экспедиции на НИС «Г.Ю. Верещагин». Координаты станций отбора проб представлены в табл. 1 / tabl. 1, местоположение станций

показаны на рис. 1 / fig. 1. Сточные воды КОС г. Северобайкальска были отобраны непосредственно из трубы сброса (ст. WW). Пробы речных вод отбирали из левого (ст. Riv 130 LA) и правого (ст. Riv 120 RA) рукавов р. Тья в 130 и 120 м выше трубы сброса сточных вод, соответственно, а также в 650 м выше устья (ст. Riv). Вода на этой станции (ст. Riv) с большой вероятностью отражает конечный состав речных вод с учетом подмешивания сточных вод. Вследствие низкого рельефа и ветровых нагонных процессов отбор речных проб вблизи устья не целесообразен, поскольку смешение с байкальскими водами будет искажать состав речных вод. В прибрежной зоне Байкала (~ 1 м от уреза) были отобраны пробы воды в 530 м влево (ст. 530 CWL) и 550 м вправо (ст. 550 CWR) от устья основной протоки р. Тья, а также на более удаленных расстояниях – в 2,7 км вправо от устья (ст. 2.7k CWR), в 1,5 км влево от устья на лодочной станции Нептун (ст. Nep CWL). Последние две станции находятся на краях довольно широкой дельты р. Тья (~ 2,5 км). Дополнительно была отобрана проба прибрежной воды в 6,8 км влево от устья (ст. 6.8k CWL) вне зоны влияния р. Тья и г. Северобайкальска. В секторе 200-300 м от уреза в зоне влияния реки отобраны пробы поверхностной воды в 200 м напротив устья (ст. 200), в 200 м под углом влево от устья (ст. 200 L) и в 300 м под углом вправо от устья (ст. 300 R). В секторе 500-600 м от уреза в зоне влияния реки отобраны пробы поверхностной воды в 500 м напротив устья (ст. 500), в 600 м под углом влево от устья (ст. 600 L) и в 630 м под углом вправо от устья (ст. 630 R). В секторе 800 м от уреза в зоне влияния реки отобрана проба поверхностной воды в 800 м напротив устья (ст. 800). Фоновая проба байкальской воды была взята из фотического слоя (усредненная с горизонтов 0, 5, 10, 15, 20 и 25 м) в 3 км от берега (ст. 3k) напротив устья. Пробы из фотического слоя отбирали с борта НИС «Г.Ю. Верещагин» пластиковыми (ПЭ-SDR-17 (21)) батометрами (6 л – «OceanTest Equipment», Inc., USA, 12 л – «General Oceans, Inc.», США) и разливали в ПЭТ бутылки. Проба интерстициальной воды (ст. h) отобрана из лунки на стыке бокового рукава р. Тья и побережья озера в 280 м от основного устья.

Для многоэлементного ИСП-МС анализа пробы воды отбирали одноразовыми стерильными медицинскими шприцами (10 мл) непосредственно из объектов исследования. В гидрохимической лаборатории на борту НИС «Г.Ю. Верещагин» отобранные пробы в количестве 2 мл фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (размер пор 0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки Эппендорфа (2 мл, Axugen Scientific, Cat. No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта использовалась 70% HNO<sub>3</sub>, дважды очищенная с помощью суббойлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония), содержащая индий (1008 ppb) в качестве внутреннего стандарта. Консервант добавляли в пробирки Эппендорфа весовым методом. Пробирки с отобранными образцами воды

взвешивали и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2%) и индия (типично 30 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания  $\pm 0,0003$  г).

Для определения гидрохимических и физико-химических параметров образцы воды отбирали в ПЭТ бутылки. Измерения pH проводили сразу же после отбора проб pH-метром testo 252 (Германия, точность определения  $\pm 0,02$  pH).

Таблица 1

### Описание и координаты отобранных проб воды в зоне влияния КОС г. Северобайкальска

Table 1

#### Description and coordinates of the collected water samples in the zone of influence of Severobaikalsk Town WTF

Станция // Station	Описание // Description	С.Ш.	В.Д.
Riv 130 LA	р. Тья, левый рукав, 130 м выше сброса КОС г. Северобайкальска	55,6186°	109,3174°
Riv 120 RA	р. Тья, правый рукав, 120 м выше сброса КОС г. Северобайкальска	55,6176°	109,3175°
WW	Труба сброса КОС г. Северобайкальска	55,6180°	109,3193°
Riv	р. Тья, 650 м выше устья основной протоки	55,6064°	109,3398°
h	Интерстициальная вода, 280 м вправо от устья р. Тья	55,6036°	109,3470°
530 CWL	Байкал, прибреж. вода 530 м влево от устья р. Тья	55,6100°	109,3478°
550 CWR	Байкал, прибреж. вода 550 м вправо от устья р. Тья	55,6001°	109,3478°
2.7k CWR	Байкал, прибреж. вода 2,7 км вправо от устья р. Тья	55,5926°	109,3144°
Нер CWL	Байкал, прибреж. вода 1,5 км влево от устья р. Тья (залив Нептун, лодочная станция)	55,6190°	109,3511°
6.8k CWL	Байкал, прибреж. вода 6,8 км влево от устья р. Тья (напротив тоннелей)	55,6632°	109,3856°
200	Байкал, поверхн. вода, 200 м по трансекте от устья р. Тья	55,6052°	109,3531°
200 L	Байкал, поверхн. вода, 200 м от устья р. Тья под углом влево	55,6068°	109,3526°
300 R	Байкал, поверхн. вода, 300 м от устья р. Тья под углом вправо	55,6033°	109,3528°
500	Байкал, поверхн. вода, 500 м по трансекте от устья р. Тья	55,6048°	109,3576°
600 L	Байкал, поверхн. вода, 600 м от устья р. Тья под углом влево	55,6091°	109,3569°
630 R	Байкал, поверхн. вода, 630 м от устья р. Тья под углом вправо	55,6011°	109,3561°
800	Байкал, поверхн. вода, 800 м по трансекте от устья р. Тья	55,6043°	109,3624°
3k	Байкал, фотический слой (0-25 м), 3 км от уреза напротив устья р. Тья	55,6017°	109,3973°

### 1.2. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 се в ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИИ СО РАН в соответствии с разработанными ранее подходами [12]. Система ввода проб: боросиликатный распылитель MicroMist (режим подачи растворов – самораспыление), PFA распылительная камера, кварцевая горелка с системой ShieldTorch. Измерения проводили в режиме «горячей плазмы» (мощность генератора плазмы 1580 Вт) без столкновительной ячейки.

Растворы измерялись в сканирующем режиме с дополнительным заглублением сигналов в 30 раз для изотопов Na\_23, Al\_27, Si\_28, K\_39 и In\_115 (3 канала на массу, 0,05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра – 62 с, промывка между пробами – 60 с).

Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), образец байкальской бутилированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, [20]), а также растворы катионов (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) и анионов (Si, P, S, Cl, Br, I), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США): Na (Cat. No. MSNA-100PPM), Mg (Cat. No. MSMG-100PPM), K (Cat. No. MSK-100PPM), Ca (Cat. No. CGCA1), Fe (Cat. No. MSFE-100ppm), Hg (Cat. No. MSHGN-10PPM), Si (Cat. No. MSSI-100PPM), P (Cat. No. MSP-100ppm), S

(Cat. No. CGS1), Cl (Cat. No. CGICCL1), Br (Cat. No. CGICBR1), I (Cat. No. CGICI1). Металлы и Si в стандартных растворах присутствовали в азотнокислой среде, S и P в форме серной ортофосфорной кислот соответственно, галогениды – в водном растворе аммонийных солей. Концентрации элементов в рабочем стандартном растворе анионов и катионов готовили исходя из их типичных содержаний (кроме ртути и фосфора) в пресных природных водах: Na (3 ppm), Mg (3 ppm), K (1 ppm), Ca (16 ppm), Fe (0,3 ppm) и Hg (0,6 ppb), Si (2 ppm), P (1 ppm), S (5 ppm), Cl (4 ppm), Br (40 ppb) и I (20 ppb).

Корректировку на интерферирующие молекулярные ионы ( $\text{MeO}^+$ ,  $\text{MeOH}^+$ ,  $\text{MeAg}^+$ ,  $\text{MeCl}^+$ ) проводили с использованием подхода, описанного в работе [16].

Ошибки измерения элементов, оценивали по экспериментально установленной зависимости коэффициента вариации (**RSD%**) от величины аналитического сигнала ( $N$ , имп./с):  $\text{RSD}\% = 125,71 * N^{-0,33103}$ , где  $N = 20-20\ 000$  имп./с. Сигналы величиной более 20 000 имп./с характеризуются RSD 5% и лучше, сигналы величиной менее 20 имп./с характеризуются RSD более 50%. Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов находятся в следующих диапазонах:  $<0,001$  мкг/дм<sup>3</sup> – RSD >25%; 0,001-0,1 мкг/дм<sup>3</sup> – RSD 25-10%; 0,1-1 мкг/дм<sup>3</sup> – RSD 10-5%;  $>1$  мкг/дм<sup>3</sup> – RSD 5%.

**1.3. Расчет общей минерализации воды.** Расчет общей минерализации (ОМ) воды проводили по результатам многоэлементного ИСП-МС анализа с использованием баланса химических эквивалентов. При известных значениях pH рассчитывали соотношения равновесных формы угольной кислоты ( $[\text{HCO}_3^-]$ ,  $[\text{CO}_3^{2-}]$  и  $[\text{CO}_2]$ ), в отсутствии данных о pH полагали, что в типичных природных водах доминируют ее гидрокарбонатные формы (90-98% в диапазоне 7,3-9,4 pH). При составлении баланса химических эквивалентов измеренные концентрации химических элементов переводили в молярные концентрации их типичных ионных форм:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ . При содержании кремния менее 2 мМоль ( $56 \text{ мг/дм}^3$ ) полагали, что он находится в виде ортокремневой кислоты ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , слабодиссоциируемой при  $\text{pH} < 9$ ), при более высоких концентрациях – в ее полимерных формах, условно, в виде линейного полимера  $(\text{H}_2\text{SiO}_3)_n$  [5]. В расчет были также включены условно следовые элементы в формах:  $\text{Li}^+$ ,  $\text{VO}_3^{3-}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  и  $\text{Ba}^{2+}$ , которые могут присутствовать в природных и техногенных водах в значимом количестве. Составленный баланс химических эквивалентов позволяет рассчитать суммарную концентрацию ионов, которые методом ИСП-МС не определяются ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{NO}_3^-$ , полагая, что концентрация  $\text{NO}_3^-$  в водах значительно меньше суммарного содержания форм угольной кислоты) и оценить общую минерализацию воды по сумме всех ионов.

**1.4. Расчет ошибок результатов математических операций.** Расчет ошибок результатов математических операций в простых и сложных выражениях осуществлялся в соответствии с подходами, описанными в работе [18].

1. Для результатов сложения и/или вычитания.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = t_1 + t_2 - t_3 \pm \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \quad (1)$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  – абсолютные ошибки измерения переменных  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ .

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\frac{(\bar{\sigma}_1 \times t_1)^2 + (\bar{\sigma}_2 \times t_2)^2 + (\bar{\sigma}_3 \times t_3)^2}{t^{*2}}} \quad (2)$$

где  $\bar{\sigma}_1$ ,  $\bar{\sigma}_2$  и  $\bar{\sigma}_3$  – относительные ошибки измерения переменных  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ .

2. Для результатов умножения и/или деления.

Абсолютные ошибки:

$$t^* \pm \sigma^* = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{t_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{t_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{t_3}\right)^2} = \frac{t_1 \times t_2}{t_3} \pm t^* \times \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2} \quad (3)$$

Относительные ошибки:

$$\bar{\sigma}^* = \frac{\sigma^*}{t^*} = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2} \quad (4)$$

## 2. Результаты и обсуждение

В исследуемых пробах были определены концентрации 72 химических элементов. Концентрации наиболее информативных элементов, использованных в работе, представлены в табл. 2 / tabl. 2.

Согласно полученным данным, сточные воды КОС Северобайкальска превышают установленные нормативы [6] по 6 из 35 нормируемым элементам: Р (69 ПДК), Мп (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Мо (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК), и близки к предельно допустимым концентрациям по S (0,9 ПДК) и Na (0,7 ПДК).

Тепловая карта геохимических различий сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска относительно фоновых байкальских вод (ст. 3к) и фоновых речных вод (среднее для станций Riv 130 LA и Riv 120 RA – далее обозначается как Riv up), представлена на рис. 2 / fig. 2.

Из рис. 2 / fig. 2 следует, что концентрации большинства информативных химических элементов в сточных водах больше, чем в фоновых речных (столбец WW\*\*). Наибольшее различие ( $> 10$  раз), характерно для Cl (969 раз), P (238), Na (102), Zn (50), Sb (28), B (26), K (26), V (19), Mn (19), Rb (15) и Br (14). Общая минерализация сточных вод г. Северобайкальска составляла  $400 \text{ мг/дм}^3$ , что в 4,8 раза выше, чем в фоновых водах р. Тья.

Концентрация информативных химических элементов (мкг/дм<sup>3</sup>) и общая минерализация (ОМ, мг/дм<sup>3</sup>) в отобранных пробах воды в зоне влияния КОС  
г. Северобайкальска. В скобках указаны ошибки определения (отн. %)

Concentration of informative chemical elements ( $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) and total mineralization (ОМ,  $\text{mg}/\text{dm}^3$ ) in collected water samples in the zone of Severobaikalsk Town WTF  
influence. Determination errors are in brackets (rel. %)

Станция // Station	Riv 130 LA	Riv 120 RA	WW	Riv	h	530 CWL	550 CWR	2.7k CWR	Nep CWL	6.8k CWL	200	200 L	300 R	500	600 L	630 R	800	3k
Al	24 (5,0)	25 (5,0)	19 (5,0)	25 (5,0)	26 (5,0)	15,4 (5,0)	21 (5,0)	12 (5,0)	9 (5,0)	5,8 (5,0)	6,8 (5,0)	6,1 (5,0)	11,5 (5,0)	3,6 (5,0)	3,2 (5,0)	3,4 (5,0)	3,3 (5,0)	3,2 (5,0)
As	0,060 (17)	0,080 (15)	0,53 (8,1)	0,060 (17)	0,53 (8,2)	0,31 (9,7)	0,090 (14)	0,33 (9,5)	0,35 (9,4)	0,41 (8,9)	0,36 (9,3)	0,36 (9,3)	0,24 (10)	0,38 (9,1)	0,40 (8,9)	0,36 (9,2)	0,37 (9,1)	0,41 (8,8)
B	1,14 (5,0)	1,05 (5,0)	28 (5,0)	1,0 (5,0)	1,57 (5,0)	4,9 (5,0)	0,94 (5,0)	5,8 (5,0)	6,2 (5,0)	6,0 (5,0)	5,5 (5,0)	5,6 (5,0)	4,5 (5,0)	6,2 (5,0)	6,1 (5,0)	6,3 (5,0)	6,2 (5,0)	6,4 (5,0)
Ba	7,5 (5,0)	7,6 (5,0)	7,5 (5,0)	7,6 (5,0)	21 (5,0)	11,2 (5,0)	9,0 (5,0)	11,6 (5,0)	12,6 (5,0)	10,7 (5,0)	10,8 (5,0)	10,8 (5,0)	10,0 (5,0)	11,1 (5,0)	10,9 (5,0)	11,1 (5,0)	11,2 (5,0)	10,8 (5,0)
Be	0,022 (15)	0,023 (14)	0,0030 (28)	0,025 (14)	0,022 (15)	0,0050 (25)	0,017 (16)	0,0024 (30)	0,0023 (31)	0,0015 (35)	0,0027 (29)	0,0027 (29)	0,0070 (21)	0,0018 (34)	0,0013 (37)	0,0015 (35)	0,0015 (35)	0,0015 (35)
Br	3,7 (7,2)	3,6 (7,3)	52 (5,0)	3,6 (7,3)	4,5 (6,8)	8,5 (5,5)	3,8 (7,2)	8,7 (5,5)	10 (5,2)	9,8 (5,2)	8,6 (5,5)	8,8 (5,4)	7,7 (5,7)	9,8 (5,2)	9,8 (5,3)	9,6 (5,3)	9,1 (5,4)	9,5 (5,3)
Ca	12 900 (5,0)	13 000 (5,0)	29 000 (5,0)	12 900 (5,0)	16 600 (5,0)	16 800 (5,0)	12 600 (5,0)	16 800 (5,0)	20 000 (5,0)	16 700 (5,0)	16 600 (5,0)	16 700 (5,0)	15 600 (5,0)	16 800 (5,0)	16 800 (5,0)	17 100 (5,0)	17 000 (5,0)	16 800 (5,0)
Ce	0,38 (5,0)	0,41 (5,0)	0,096 (6)	0,42 (5,0)	1,42 (5,0)	0,175 (4,9)	0,39 (5,0)	0,078 (6,4)	0,053 (7,2)	0,0030 (19)	0,039 (8)	0,024 (9,4)	0,103 (5,8)	0,0038 (17)	0,0029 (19)	0,0046 (18)	0,0036 (18)	0,0036 (18)
Cl	87 (4,8)	72 (5,1)	77 000 (5,0)	112 (5,0)	300 (5,0)	650 (5,0)	92 (5,0)	530 (5,0)	1 900 (5,0)	560 (5,0)	560 (5,0)	570 (5,0)	410 (5,0)	550 (5,0)	580 (5,0)	570 (5,0)	560 (5,0)	580 (5,0)
Co	0,081 (7,1)	0,081 (7,1)	0,43 (5,0)	0,089 (6,9)	1,45 (5,0)	0,093 (6,8)	0,12 (6,3)	0,083 (7)	0,085 (7)	0,066 (7,6)	0,066 (7,6)	0,063 (7,7)	0,075 (7,3)	0,060 (7,9)	0,066 (7,6)	0,062 (7,8)	0,067 (7,6)	0,067 (7,6)
Cr	0,14 (12)	0,11 (13)	1,07 (6,1)	0,10 (14)	0,18 (11)	0,08 (14)	0,10 (13)	0,13 (12)	0,18 (11)	0,10 (13)	0,13 (12)	0,08 (14)	0,08 (14)	0,14 (12)	0,08 (14)	0,08 (14)	0,11 (13)	0,11 (13)
Cs	0,0070 (15)	0,0054 (16)	0,060 (7,1)	0,0059 (15)	0,0070 (15)	0,0038 (18)	0,0039 (18)	0,0021 (22)	0,0025 (20)	0,0017 (23)	0,0026 (20)	0,0026 (20)	0,0032 (19)	0,0015 (24)	0,0021 (22)	0,0019 (22)	0,0018 (23)	0,0014 (25)
Cu	0,48 (5,0)	0,48 (4,8)	2,1 (5,0)	0,55 (5,0)	1,01 (5,0)	0,37 (5,3)	0,52 (5,0)	0,43 (5,0)	0,66 (5,0)	0,41 (5,1)	0,28 (5,8)	0,28 (5,8)	0,37 (5,3)	0,22 (6,3)	0,28 (5,8)	0,39 (5,2)	0,24 (6,1)	0,22 (6,3)
Fe	33 (5,0)	31 (5,0)	160 (5,0)	40 (5,0)	490 (5,0)	86 (5,0)	118 (5,0)	30 (5,0)	50 (5,0)	12,7 (5,0)	16,8 (5,0)	16,7 (5,0)	20 (5,0)	13,9 (5,0)	13,4 (5,0)	9,2 (5,1)	10,3 (5,0)	10,3 (5,0)
Ga	0,012 (16)	0,013 (16)	0,030 (12)	0,012 (16)	<0,0006 (nd)	0,0060 (21)	0,011 (17)	0,0070 (19)	0,0035 (25)	0,0022 (29)	0,0031 (26)	0,0019 (30)	0,0028 (26)	0,0018 (31)	0,0009 (38)	0,0007 (41)	0,0009 (38)	0,0009 (38)
Ge	0,009 (23)	0,006 (26)	0,017 (19)	0,007 (25)	0,028 (16)	0,005 (29)	0,008 (24)	0,005 (28)	0,007 (25)	0,003 (32)	0,004 (29)	0,0022 (37)	0,0021 (37)	0,0026 (35)	0,003 (33)	0,0026 (35)	0,003 (32)	0,0014 (43)
HREE	0,0572 (6,7)	0,0633 (6,3)	0,0109 (11)	0,0609 (6,5)	0,0943 (5,4)	0,0124 (11)	0,0470 (7)	0,0071 (13)	0,0068 (13)	0,0038 (15)	0,0057 (14)	0,0035 (17)	0,0155 (9,7)	0,0021 (18)	0,0023 (17)	0,00099 (24)	0,0022 (17)	0,0012 (20)
I	1,19 (5,6)	0,62 (6,9)	3,6 (5,0)	0,41 (7,9)	1,35 (5,3)	2,6 (5,0)	0,48 (7,5)	2,2 (5,0)	3,0 (5,0)	3,5 (5,0)	1,9 (5,0)	2,1 (5,0)	1,51 (5,1)	2,4 (5,0)	3,1 (5,0)	2,3 (5,0)	2,5 (5,0)	3,5 (5,0)
K	670 (5,0)	670 (5,0)	17 400 (5,0)	680 (5,0)	1 550 (5,0)	960 (5,0)	670 (5,0)	980 (5,0)	1 130 (5,0)	970 (5,0)	940 (5,0)	960 (5,0)	870 (5,0)	970 (5,0)	950 (5,0)	980 (5,0)	980 (5,0)	990 (5,0)
La	0,45 (5,0)	0,48 (5,0)	0,038 (8)	0,48 (5,0)	0,80 (5,0)	0,13 (5,4)	0,32 (5,0)	0,058 (7)	0,037 (8,1)	0,007 (14)	0,039 (8)	0,021 (9,8)	0,108 (5,7)	0,0059 (15)	0,0065 (14)	0,0070 (14)	0,0047 (16)	0,0047 (16)
Li	1,04 (5,0)	1,18 (5,0)	2,5 (5,0)	1,08 (5,0)	0,93 (5,0)	2,9 (5,0)	1,1 (5,0)	2,7 (5,0)	2,7 (5,0)	2,7 (5,0)	2,4 (5,0)	3,0 (5,0)	2,4 (5,0)	2,9 (5,0)	3,0 (5,0)	2,9 (5,0)	2,9 (5,0)	2,3 (5,0)

Станиця // Station	Riv 130 LA	Riv 120 RA	WW	Riv	h	530 CWL	550 CWR	2.7k CWR	Nep CWL	6.8k CWL	200	200 L	300 R	500	600 L	630 R	800	3k
LREE	0,941 (3,2)	1,008 (3,2)	0,142 (4,6)	1,014 (3,2)	2,41 (3,4)	0,333 (3,4)	0,790 (3,2)	0,148 (4,4)	0,0980 (5,0)	0,0114 (10)	0,0860 (5,3)	0,0501 (6,3)	0,238 (3,7)	0,0107 (11)	0,0104 (11)	0,0129 (9,8)	0,0091 (11)	0,0091 (11)
Mg	3 100 (5,0)	3 100 (5,0)	7 300 (5,0)	3 100 (5,0)	3 800 (5,0)	3 500 (5,0)	3 000 (5,0)	3 200 (5,0)	4 400 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)	3 200 (5,0)
Mn	3,2 (5,0)	3,1 (5,0)	60 (5,0)	4,7 (5,0)	370 (5,0)	7,5 (5,0)	10,1 (5,0)	1,24 (5,0)	1,43 (5,0)	0,31 (5,0)	2,6 (5,0)	2,5 (5,0)	2,6 (5,0)	0,188 (5,0)	0,149 (5,4)	0,191 (5,0)	0,140 (5,5)	0,140 (5,5)
Mo	0,53 (5,6)	0,52 (5,6)	1,68 (5,0)	0,55 (5,5)	0,53 (5,5)	1,15 (5,0)	0,55 (5,5)	1,33 (5,0)	1,35 (5,0)	1,39 (5,0)	1,33 (5,0)	1,32 (5,0)	1,14 (5,0)	1,36 (5,0)	1,38 (5,0)	1,37 (5,0)	1,4 (5,0)	1,4 (5,0)
MREE	0,634 (4,2)	0,632 (4,3)	0,0714 (8)	0,665 (4,2)	1,11 (3,5)	0,157 (6,7)	0,435 (4,8)	0,071 (8,4)	0,0505 (9,4)	0,0285 (13)	0,0430 (9,8)	0,026 (12)	0,146 (6,8)	0,0095 (15)	0,0205 (13)	0,0058 (21)	0,0088 (16)	0,0074 (18)
Na	790 (5,0)	780 (5,0)	80 000 (5,0)	810 (5,0)	900 (5,0)	2 900 (5,0)	830 (5,0)	3 500 (5,0)	3 900 (5,0)	3 600 (5,0)	3 300 (5,0)	3 400 (5,0)	2 700 (5,0)	3 500 (5,0)	3 500 (5,0)	3 600 (5,0)	3 600 (5,0)	3 600 (5,0)
Ni	0,52 (6,2)	0,45 (6,5)	1,7 (5,0)	0,39 (6,9)	1,57 (5,0)	0,26 (7,8)	0,41 (6,7)	0,21 (8,4)	0,31 (7,4)	0,43 (6,6)	0,23 (8,2)	0,22 (8,3)	0,26 (7,9)	0,23 (8,1)	0,29 (7,6)	0,21 (8,4)	0,18 (8,8)	0,15 (9,4)
P	40 (5,0)	18,1 (5,0)	6 900 (5,0)	40 (5,0)	54 (5,0)	31 (5,0)	34 (5,0)	49 (5,0)	44 (5,0)	35 (5,0)	30 (5,0)	23 (5,0)	42 (5,0)	27 (5,0)	25 (5,0)	30 (5,0)	37 (5,0)	29 (5,0)
Pb	0,014 (13)	0,014 (13)	0,094 (6,9)	0,022 (11)	0,21 (5,2)	0,032 (9,8)	0,047 (8,7)	0,023 (11)	0,026 (10)	0,023 (11)	0,015 (12)	0,015 (12)	0,016 (12)	0,0060 (17)	0,010 (14)	0,022 (11)	0,007 (16)	0,006 (17)
Pr	0,111 (5,2)	0,118 (5,1)	0,0080 (12)	0,114 (5,1)	0,19 (5,0)	0,028 (8,1)	0,080 (5,8)	0,012 (11)	0,0080 (12)	0,0014 (22)	0,0080 (12)	0,0051 (14)	0,027 (8,2)	0,0010 (24)	0,0010 (25)	0,0013 (22)	0,0008 (26)	0,0008 (26)
Rb	1,05 (5,0)	1,06 (5,0)	15,5 (5,0)	1,07 (5,0)	2,6 (5,0)	0,93 (5,0)	1,05 (5,0)	0,70 (5,0)	0,73 (5,0)	0,59 (5,0)	0,67 (5,0)	0,67 (5,0)	0,79 (5,0)	0,59 (5,0)	0,59 (5,0)	0,60 (5,0)	0,61 (5,0)	0,61 (5,0)
S	3 100 (5,0)	2 700 (5,0)	14 200 (5,0)	2 700 (5,0)	3 000 (5,0)	2 100 (5,0)	2 300 (5,0)	2 200 (5,0)	2 500 (5,0)	2 000 (5,0)	1 770 (5,0)	1 600 (5,0)	2 200 (5,0)	1 900 (5,0)	1 780 (5,0)	1 900 (5,0)	2 000 (5,0)	2 200 (5,0)
Sb	0,015 (18)	0,010 (21)	0,35 (6,4)	0,011 (20)	0,019 (17)	0,025 (15)	0,013 (19)	0,031 (14)	0,092 (10)	0,034 (14)	0,025 (15)	0,022 (16)	0,025 (15)	0,028 (15)	0,034 (14)	0,030 (14)	0,025 (15)	0,025 (15)
Si	2 600 (5,0)	2 600 (5,0)	5 300 (5,0)	2 500 (5,0)	2 900 (5,0)	980 (5,0)	2 400 (5,0)	620 (5,0)	760 (5,0)	640 (5,0)	650 (5,0)	620 (5,0)	1 130 (5,0)	540 (5,0)	590 (5,0)	540 (5,0)	540 (5,0)	560 (5,0)
Sr	42 (5,0)	43 (5,0)	90 (5,0)	43 (5,0)	58 (5,0)	93 (5,0)	43 (5,0)	108 (5,0)	115 (5,0)	109 (5,0)	105 (5,0)	106 (5,0)	88 (5,0)	110 (5,0)	110 (5,0)	110 (5,0)	111 (5,0)	110 (5,0)
Th	0,056 (6,7)	0,055 (6,8)	0,027 (8,6)	0,054 (6,8)	0,099 (5,6)	0,016 (10)	0,056 (6,8)	0,012 (11)	0,0070 (13)	0,0010 (25)	0,0054 (15)	0,0043 (16)	0,018 (9,8)	0,0013 (24)	0,0012 (24)	0,00090 (26)	0,0014 (23)	0,0014 (23)
Ti	0,52 (9,8)	0,47 (10)	1,6 (6,7)	0,45 (10)	0,93 (8)	0,44 (10)	0,59 (9,4)	0,31 (12)	0,37 (11)	0,22 (13)	0,26 (12)	0,20 (13)	0,28 (12)	0,21 (13)	0,24 (13)	0,18 (14)	0,20 (13)	0,22 (13)
U	0,38 (5,0)	0,41 (5,0)	0,20 (5,0)	0,40 (5,0)	0,179 (5,0)	0,63 (5,0)	0,35 (5,0)	0,57 (5,0)	1,33 (5,0)	0,60 (5,0)	0,60 (5,0)	0,60 (5,0)	0,55 (5,0)	0,56 (5,0)	0,58 (5,0)	0,57 (5,0)	0,58 (5,0)	0,55 (5,0)
V	0,068 (7,6)	0,068 (7,6)	1,31 (5,0)	0,067 (7,7)	0,45 (5,0)	0,25 (5,0)	0,158 (5,8)	0,35 (5,0)	0,24 (5,0)	0,41 (5,0)	0,34 (5,0)	0,36 (5,0)	0,26 (4,9)	0,41 (5,0)	0,38 (5,0)	0,38 (5,0)	0,39 (5,0)	0,40 (5,0)
W	0,0090 (19)	0,011 (17)	0,020 (14)	0,010 (18)	0,010 (18)	0,034 (12)	0,0090 (19)	0,045 (11)	0,048 (11)	0,055 (10)	0,043 (11)	0,039 (11)	0,038 (11)	0,052 (10)	0,053 (10)	0,048 (10)	0,050 (10)	0,056 (10)
Y	0,25 (5,0)	0,25 (5,0)	0,041 (7,9)	0,23 (5,0)	0,38 (5,0)	0,059 (7)	0,154 (5,1)	0,032 (8,5)	0,034 (8,3)	0,025 (9,2)	0,025 (9,3)	0,015 (11)	0,060 (6,9)	0,008 (13)	0,020 (9,9)	0,0080 (14)	0,011 (12)	0,0080 (13)
Zn	0,84 (6,4)	0,51 (7,6)	34 (5,0)	0,54 (7,5)	1,08 (5,9)	0,28 (9,3)	0,4 (8,3)	0,32 (8,9)	0,87 (6,4)	0,32 (8,8)	0,39 (8,3)	0,4 (8,2)	0,33 (8,8)	0,4 (8,2)	0,29 (9,2)	0,35 (8,6)	0,36 (8,5)	0,36 (8,5)
Zr	0,021 (13)	0,018 (13)	0,031 (11)	0,019 (13)	0,068 (8,5)	0,016 (14)	0,020 (13)	0,010 (16)	0,010 (16)	0,004 (22)	0,0038 (22)	0,0050 (20)	0,0080 (17)	0,0038 (20)	0,0050 (20)	0,0050 (20)	0,0060 (19)	0,0038 (22)
OM	82 (3,0)	83 (3,0)	400 (2,5)	82 (3,0)	100 (2,9)	100 (3,1)	80 (3,0)	100 (3,1)	120 (3,0)	100 (3,1)	100 (3,2)	100 (3,2)	96 (3,1)	100 (3,2)	100 (3,2)	100 (3,2)	100 (3,2)	100 (3,1)

WW **	WW *	Riv **	h *	Riv up *	Riv *	Элемент Element	550 CWR *	530 CWL *	2.7k CWR *	Nep CWL *	6.8k CWL *	300 R *	200 *	200 L *	630 R *	500 *	600 L *	800 *
							Прибрежная зона Coastal zone					Сектор 200-300 м Sector of 200-300 m			Сектор 500-600 м Sector of 500-600 m			800 м
0,07	10	1,00	238	143	143	Pr	100	35	15	10	1,8	34	10	6,4	1,6	1,3	1,3	1,00
0,24	27	1,06	394	110	117	Ce	108	49	22	15	0,83	29	11	6,7	1,3	1,06	0,81	1,00
0,15	16	1,04	265	107	111	LREE	87	37	16	11	1,3	26	9,5	5,5	1,4	1,2	1,1	1,00
0,08	8,1	1,03	170	99	102	La	68	28	12	7,9	1,5	23	8,3	4,5	1,5	1,3	1,4	1,00
0,11	9,6	1,05	150	85	90	MREE	59	21	9,6	6,8	3,8	20	5,8	3,5	0,78	1,3	2,8	1,2
0,18	9,5	1,01	82	52	53	HREE	41	11	6,2	5,9	3,3	13	5,0	3,0	0,86	1,8	2,0	1,9
0,49	19	0,97	71	40	39	Th	40	11	8,6	5,0	0,71	13	3,9	3,1	0,64	0,93	0,86	1,00
19	429	1,5	2643	23	34	Mn	72	54	8,9	10	2,2	19	19	18	1,4	1,3	1,06	1,00
0,16	5,1	0,92	48	31	29	Y	19	7,4	4,0	4,3	3,1	7,5	3,1	1,9	1,00	1,00	2,5	1,4
0,13	2,0	1,1	15	15	17	Be	11	3,3	1,6	1,5	1,00	4,7	1,8	1,8	1,00	1,2	0,87	1,00
2,4	33	0,96	0,67	14	13	Ga	12	6,7	7,8	3,9	2,4	3,1	3,4	2,1	0,78	2,0	1,00	1,00
0,78	5,9	1,02	8,1	7,7	7,8	Al	6,6	4,8	3,8	2,8	1,8	3,6	2,1	1,9	1,06	1,1	1,00	1,03
2,3	12	0,93	20	5,4	5,0	Ge	5,7	3,6	3,6	5,0	2,1	1,5	2,9	1,6	1,9	1,9	2,1	2,1
1,6	8,2	0,97	18	5,1	5,0	Zr	5,3	4,2	2,6	2,6	1,05	2,1	1,00	1,3	1,3	1,00	1,3	1,6
2,0	9,5	0,96	5,2	4,6	4,5	Si	4,3	1,8	1,1	1,4	1,1	2,0	1,2	1,1	0,96	0,96	1,05	0,96
9,7	43	0,95	5,0	4,4	4,2	Cs	2,8	2,7	1,5	1,8	1,2	2,3	1,9	1,9	1,4	1,07	1,5	1,3
5,0	16	1,3	48	3,1	3,9	Fe	11	8,3	2,9	4,9	1,2	1,9	1,6	1,6	0,89	1,3	1,3	1,00
3,7	16	1,6	35	2,3	3,7	Pb	7,8	5,3	3,8	4,3	3,8	2,7	2,5	2,5	3,7	1,00	1,7	1,2
6,5	11	0,80	11	3,2	2,6	Ni	2,7	1,7	1,4	2,1	2,9	1,7	1,5	1,5	1,4	1,5	1,9	1,2
4,4	9,5	1,1	4,6	2,2	2,5	Cu	2,4	1,7	2,0	3,0	1,9	1,7	1,3	1,3	1,8	1,00	1,3	1,09
3,2	7,3	0,91	4,2	2,3	2,0	Ti	2,7	2,0	1,4	1,7	1,00	1,3	1,2	0,91	0,82	0,95	1,09	0,91
15	25	1,01	4,3	1,7	1,8	Rb	1,7	1,5	1,1	1,2	0,97	1,3	1,10	1,10	0,98	0,97	0,97	1,00
50	94	0,80	3,0	1,9	1,5	Zn	1,1	0,78	0,89	2,4	0,89	0,9	1,08	1,1	0,97	1,1	0,81	1,00
238	238	1,4	1,9	1,00	1,4	P	1,2	1,07	1,7	1,5	1,2	1,4	1,03	0,79	1,03	0,93	0,86	1,3
5,3	6,4	1,10	22	1,2	1,3	Co	1,8	1,4	1,2	1,3	0,99	1,1	0,99	0,94	0,93	0,90	0,99	1,00
4,9	6,5	0,93	1,4	1,3	1,2	S	1,05	0,95	1,00	1,1	0,91	1,0	0,80	0,73	0,86	0,86	0,81	0,91
2,4	2,3	1,00	1,2	0,97	0,97	Mg	0,94	1,09	1,00	1,4	1,00	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8,6	9,7	0,80	1,6	1,1	0,91	Cr	0,91	0,73	1,2	1,6	0,91	0,7	1,2	0,73	0,73	1,3	0,73	1,00
4,8	4,0	0,99	1,00	0,83	0,82	OM	0,80	1,00	1,00	1,2	1,00	1,0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2,2	1,7	1,00	0,99	0,77	0,77	Ca	0,75	1,00	1,00	1,2	0,99	0,9	0,99	0,99	1,02	1,00	1,00	1,01
0,51	0,36	1,01	0,33	0,72	0,73	U	0,64	1,1	1,04	2,4	1,09	1,0	1,09	1,09	1,04	1,02	1,05	1,05
0,99	0,69	1,01	1,9	0,70	0,70	Ba	0,83	1,04	1,07	1,2	0,99	0,9	1,00	1,00	1,03	1,03	1,01	1,04
26	18	1,01	1,6	0,68	0,69	K	0,68	0,97	0,99	1,1	0,98	0,9	0,95	0,97	0,99	0,98	0,96	0,99
2,3	1,09	0,97	0,40	0,48	0,47	Li	0,48	1,3	1,2	1,2	1,2	1,0	1,04	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
28	14	0,88	0,76	0,50	0,44	Sb	0,52	1,00	1,2	3,7	1,4	1,0	1,00	0,88	1,2	1,1	1,4	1,00
3,2	1,2	1,05	0,38	0,38	0,39	Mo	0,39	0,82	0,95	0,96	0,99	0,8	0,95	0,94	0,98	0,97	0,99	1,00
2,1	0,82	1,01	0,53	0,39	0,39	Sr	0,39	0,85	0,98	1,05	0,99	0,8	0,95	0,96	1,00	1,00	1,00	1,01
14	5,5	0,99	0,47	0,38	0,38	Br	0,40	0,89	0,92	1,05	1,03	0,8	0,91	0,93	1,01	1,03	1,03	0,96
102	22	1,03	0,25	0,22	0,23	Na	0,23	0,81	0,97	1,08	1,00	0,8	0,92	0,94	1,00	0,97	0,97	1,00
969	133	1,4	0,52	0,14	0,19	Cl	0,16	1,1	0,91	3,3	0,97	0,7	0,97	0,98	0,98	0,95	1,00	0,97
2,0	0,36	1,00	0,18	0,18	0,18	W	0,16	0,61	0,80	0,86	0,98	0,7	0,77	0,70	0,86	0,93	0,95	0,89
19	3,3	0,99	1,1	0,17	0,17	V	0,40	0,63	0,88	0,60	1,03	0,7	0,85	0,90	0,95	1,03	0,95	0,98
26	4,4	0,91	0,25	0,17	0,16	B	0,15	0,77	0,91	0,97	0,94	0,7	0,86	0,88	0,98	0,97	0,95	0,97
7,6	1,3	0,86	1,3	0,17	0,15	As	0,22	0,76	0,80	0,85	1,00	0,6	0,88	0,88	0,88	0,93	0,98	0,90
4,0	1,03	0,45	0,39	0,26	0,12	I	0,14	0,74	0,63	0,86	1,00	0,4	0,54	0,60	0,66	0,69	0,89	0,71

Ранг различий // Rank of differences	Ранг различий // Rank of differences
(14) >100 раз // times	(0) <0,01 раз // times
(13) 30-100 раз // times	(1) 0,01-0,033 раз // times
(12) 10-30 раз // times	(2) 0,033-0,1 раз // times
(11) 5-10 раз // times	(3) 0,1-0,2 раз // times
(10) 3-5 раз // times	(4) 0,2-0,33 раз // times
(9) 2-3 раза // times	(5) 0,33-0,5 раз // times
(8) 1,1-2 раз // times	(6) 0,5-0,91 раз // times
(7) 0,91-1,1 раз // times (7*) 0,91-1,1 раз – нет достоверных отличий // times - no reliable differences	(7*) ≤0,91 или ≥1,1 раз - нет достоверных отличий (перекрывание доверительных интервалов) // times - no reliable differences (overlapping of confidence intervals)

Рис. 2. Тепловая карта геохимических различий (в разях), сточных, речных, интерстициальных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния сточных вод КОС г. Северобайкальска

Примечания: \* – относительно фотического слоя в 3 км от уреза, \*\* – относительно р. Тья выше сброса сточных вод, OM – общая минерализация.

Fig. 2. Heat map of geochemical differences (in times) of waste, riverine, interstitial and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of wastewaters from Severobaikalsk town WTF

Notes: \* – relative to photic layer in 3 km from water cut, \*\* – relative to the Tyra River above the waste waters discharge, OM – total mineralization.

При сравнении геохимического состава речных вод вблизи устья и на участке 120-130 м выше трубы сброса КОС (рис. 2 / fig. 2, столбец Riv\*\*) влияние сточных вод обнаруживается только по P (1,4 раза) и Cl (1,4). Обогащение речной воды вблизи устья по Mn (1,5) и Fe (1,3), скорее всего, связано с мобилизацией этих элементов из заболоченных проток в приустьевой зоне. Обогащение по Pb (1,6) и Cu (1,2) также не связано с влиянием стоков, поскольку в самих стоках это обогащение невелико: Pb (6,7), Cu (4,4). Столь небольшой набор элементов и малые степени обогащения обусловлены тем, что сточные воды очень сильно разбавляются речными.

Из соотношений концентраций консервативных (не меняющих своей концентрации при прохождении физико-химических и биогеохимических барьеров) и наиболее контрастных (значительно различающихся по концентрации) элементов в сточных водах ( $C_{ww}$ ), в реке до ( $C_{riv\_up}$ ) и после ( $C_{riv}$ ) смешения (в устье) можно рассчитать долю сточных вод в общем речном потоке ( $Part_{ww\_riv}$ ) согласно подходам, разработанным ранее [13], по итоговому выражению:

$$Part_{ww\_riv} = \frac{C_{riv} - C_{riv\_up}}{C_{ww} - C_{riv\_up}} \quad (5)$$

Для системы «р. Тья – сточные воды КОС г. Северобайкальска» единственным пригодным для расчета элементом является Cl, поскольку Mn и P не являются консервативными, а контрастность по Na недостаточна, чтобы по нему надежно различить фоновые речные воды ( $C_{riv\_up}$ ) и приустьевые речные воды после смешения ( $C_{riv}$ ) (см. выше и рис. 2 / fig. 2, столбцы WW\*\*, Riv\*\*).

Доля сточных вод в общем речном потоке, рассчитанная по Cl согласно (5) составляет всего 0,042 ± 0,009%.

Геохимической особенностью р. Тья является высокое содержание редкоземельных элементов (LREE, MREE, HREE – суммы легких, средних и тяжелых лантанидов, соответственно), Th, Y, Be и Ga, концентрации которых на один-два порядка больше, чем в байкальской воде на фоновой станции (рис. 2 / fig. 2, столбцы Riv up\*, Riv\*). Наибольшее различие характерно для легких лантанидов (La, Ce, Pr) и их суммы (LREE), которое составляет два порядка. Высокий ранг различий (5-10 раз) также характерен и для Al, Ge и Zr. Данная особенность, вероятно, обусловлена геологическим строением бассейна района, поскольку концентрация этих элементов (за искл. Zr) аномально высока и в двух соседних притоках Байкала (р. Слюдянка, р. Рель), которые были опробованы ранее, в ходе экспедиции 2020 г. Указанные выше элементы (за исключением, Ga и Ge) – типичные терригенные труднорастворимые, которые обычно мигрируют в составе взвешенного вещества. Однако в данном случае, большая их часть, скорее всего, мигрирует в составе тонкодисперсных Fe-Al коллоидов (>50 кДа), стабилизированных органическим веществом [19, 17, 12], поскольку вода этих рек содержит очень мало взвеси. То есть, для дальнейшей оценки степени влияния р. Тья на приле-

гающую литораль, данные элементы, наряду с другими, будут рассматриваться как условно консервативные, пригодные для расчета водных вкладов основных источников смешения – загрязненных речных вод (ст. Riv) и байкальских фоновых вод (ст. 3к).

Тепловая карта геохимических различий исследованных вод (рис. 2 / fig. 2) ранжирована по степени убывания отношений концентрации элементов в р. Тья на приустьевом участке относительно байкальских фоновых вод (столбец Riv\*) и визуально показывает степень влияния р. Тья на прилегающую литораль.

Визуально (рис. 2 / fig. 2) наибольшее сходство с речной водой наблюдается в прибрежных водах справа от устья основной протоки (ст. 550 CWR, 550 м от устья), в меньшей степени слева (ст. 530 CWL, 530 м от устья), и в наименьшей степени на правом краю дельты (ст. 2.7k CWR) в связи с большой удаленностью от устья (2,7 км). На левом краю дельты (ст. Nep CWL, 1,5 км от устья) прибрежная вода испытывает влияние дополнительных источников, в числе которых могут быть и антропогенные от лодочной станции Нептун. Это влияние проявляется в виде повышенных концентраций Ge, Cu, Zn, S, Mg, Cr, Ca, U, Ba, K, Sb и Cl по сравнению со станцией 530 CWL. Прибрежная вода вне зоны влияния р. Тья (ст. 6.8k CWL, 6,8 км влево от устья) по большинству информативных элементов не отличима от байкальской воды на фоновой станции, однако повышенное содержание ряда элементов (REE, Ga, Al, Si, Fe, Pb, Ni, Cu, P, Li и Sb) свидетельствует о береговом влиянии (абразия берегов, площадной смыв, дренаж интерстициальных вод).

В секторе 200-300 м от уреза большая степень влияния проявлена также на участке вправо от устья реки (ст. 300 R), что обусловлено воздействием береговых геострофических течений, направление которых в данном районе осуществляется против часовой стрелки [2]. Более того, во время отбора проб было умеренное волнение (~3 балла) с северо-восточным направлением ветра, что совпадает с направлением геострофических течений.

В секторах 500-600 и 800 м от уреза влияние р. Тья по большинству элементов не обнаруживается, за исключением некоторых редкоземельных элементов, марганца и йода. Эпизодические превышения байкальских фоновых концентраций наблюдаются по Al (1,1 раза), Fe (1,3 раза), Pb (1,7-3,7 раза), Ni (1,4-1,9 раза), Cu (1,3-1,8 раза), P (1,3 раза), Li (1,3 раза) и Sb (1,4 раза), однако это не связано с влиянием реки, поскольку степень обогащения этими элементами речных вод относительно фоновой станции 3к невелика (<10 раз). Скорее всего, это связано с факторами берегового влияния и неоднородностью распределения тонкодисперсной взвеси.

Интерстициальная вода (ст. h) вблизи устья испытывает сильное влияние р. Тья, на которое накладываются процессы взаимодействия воды с горными породами, что приводит к дополнительному обогащению интерстициальных вод большинством элементов (REE, Y, Th, Ge, Zr, Si, Cs, Pb, Ni, Cu, Ti, Rb, Z, P, Co, S, Mg, Cr, Ca, Ba, K, Sb, Sr, Br, Na, Cl, V, B, As, I), среди которых наибольшие степени обогащения (>10 раз от-

носителем речных вод) характерны для чувствительных к Red-Ох потенциалу Mn (79) и Fe (12), а также Co (16) и Pb (10), высокие (~3-10 раз) для типичных диагенетических As (8,8) и V (6,7), а также Ge (4,0), Ni (4,0), Ba (2,8), I (3,3) и Cl (2,7). В тоже время наблюдается заметное обеднение по U (2,2 раз), который, скорее всего, фиксируется органическим веществом, присутствующим в осадочных отложениях [4, 7].

Литоральные воды в зоне влияния р. Тья формируются за счет смешения двух основных источников – речной воды, загрязненной сточными водами (ст. Riv), и фоновой байкальской воды (ст. 3к). Для расчета водного вклада загрязненных речных вод в воды литорали ( $Part_{riv\_lit}$ ) мы применили подход, описанный в [14], с использованием системы уравнений для двух источников:

$$C_{i\_расчет} = \frac{Part_{riv\_lit} \times C_{i\_riv} + Part_{bw\_lit} \times C_{i\_bw}}{Part_{riv\_lit} + Part_{bw\_lit}} \quad (6)$$

$$Part_{riv\_lit} + Part_{bw\_lit} = 1 \quad (7)$$

$$Part_{riv\_lit} \geq 0; Part_{bw\_lit} \geq 0 \quad (8)$$

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{C_{i\_расчет} - C_i}{C_i} \right) \times 100 \right]^2} \rightarrow 0 \quad (9)$$

где  $C_{i\_расчет}$  и  $C_i$  – расчетная и измеренная концентрация элемента  $i$  в объектах смешения (в прибрежных и поверхностных водах литорали Байкала), соответственно;  $C_{i\_riv}$ ,  $C_{i\_bw}$  – измеренные концентрации элемента  $i$  в загрязненной речной и байкальской фоновой водах, соответственно, а  $Part_{riv\_lit}$ ,  $Part_{bw\_lit}$  – массовые (или объемные) доли соответствующих вод;  $\Delta$  – среднеквадратичное расхождение расчетных и измеренных концентраций элементов в объектах смешения (в%).

Решение системы уравнений (6)-(9) является задачей на оптимизацию переменных (водных вкладов  $Part_{riv\_lit}$ ,  $Part_{bw\_lit}$ ) при поиске глобального минимума по параметру  $\Delta$  и осуществлялось численными методами с помощью модуля «Поиск решения» в ПО Excel 2003.

Водные вклады сточных вод в литорали Байкала ( $Part_{ww\_lit}$ ) рассчитываются через полученные водные вклады загрязненных речных вод в литорали

Байкала и водный вклад сточных вод в р. Тья, полученный по (5), согласно [13]:

$$Part_{ww\_lit} = Part_{riv\_lit} \times Part_{ww\_riv} \quad (10)$$

Для данной системы источников и объектов смешения информативные химические элементы охарактеризованы по степени контрастности, консервативности и надежности определения. На рис. 3 / fig. 3 они ранжированы по степени уменьшения фактора контрастности ( $FC$ ):

$$FC = P/\Phi \quad (11)$$

где  $P/\Phi$  – отношения концентраций элементов в источниках смешения:  $P$  – р. Тья (ст. Riv),  $\Phi$  – байкальская вода на фоновой станции (ст. 3к). Для  $P/\Phi < 1$  взяты обратные величины.

По фактору контрастности элементы условно разделены на **СВКт** – сверхвысоко контрастные ( $FC > 100$ ), **ВКт** – высококонтрастные ( $FC = 10-100$ ), **Кт** – контрастные ( $FC = 5-10$ ), **СКт** – средне контрастные ( $FC = 2-5$ ), **Нкт** – низко контрастные ( $FC = 1,4-2$ ), **ОНкт** – очень низко контрастные ( $FC < 1,4$ ).

По степени консервативности элементы разделены на **Тк** – типично консервативные главные элементы (Na, Cl); **К** – консервативные (B, I, W, Cs, Br, Sr, Mo, Li, Rb, Ba, Co, S, Ca, Mg, общая минерализация); **Ук** – условно консервативные, которые преимущественно мигрируют в растворенной форме, но в определенных условиях могут утилизироваться в твердую фазу (осаждение, сорбция – Ga, Ge, Pb, Ni, Cu, Sb, Zn, U) или, наоборот, ремобилизоваться из донных отложений в процессе диагенеза (д) (As, V), частично поглощаться гидробионтами (K, Si – частично биогенные (**чб**)), частично мигрировать в составе мелкодисперсной терригенной взвеси (**взв**) (Al, Cr, Ti). В данном случае к условно консервативным элементам отнесены трудно-растворимые REE, Y, Th, Be, Th, которые могут мигрировать в составе тонкодисперсных Fe-Al коллоидов, стабилизированных органическим веществом (**орг**); **Нк** – неконсервативные, которые в водной среде легко меняют форму нахождения (растворенная / нерастворенная) при изменении окислительно-восстановительного потенциала (**о/в**) (Mn, Fe), или могут быть в значительной степени утилизированы гидробионтами (Р – биогенный (**б**)). В данном случае Si мы перенесли в категорию **Ук(чб)**, поскольку из-за сильного влияния реки процессы смешения вод в литорали доминируют над процессами его биологической утилизации.

Элемент // Element	FC	Контрастность // Contrast	Консервативность // Conservative-ness	Надежность определения // Determination reliability	НизК, ОНизК во всех или в большинстве (* ) объектов // In all or in most of objects	ОНизК в источниках смешения // in mixing sources	Группа {1} // Group {1}	Группа {2} // Group {2}	Группа {1}+{2} // Group {1}+{2}	Группа {все**} // Group {all**}
Pr	143	СВКт	УК(орг)	УНО	НизК*	Ф	1		1	1
Ce	117	СВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
LREE	111	СВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
La	102	СВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
MREE	90	ВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
HREE	53	ВКт	УК(орг)	УНО	НизК	Ф	1		1	1
Th	39	ВКт	УК(орг)	УНО	НизК	Ф	1		1	1
Mn	34	ВКт	НК (о/в)	НО						
Y	29	ВКт	УК(орг)	УНО		Ф	1		1	1
Be	17	ВКт	УК(орг)	УНО	НизК	Ф	1		1	1
Ga	13	ВКт	УК	УНО	ОНизК*	Ф				
I	8,5*	Кт	К	ННО						
Al	7,8	Кт	УК(взв)	НО						1
As	6,8*	Кт	УК(д)	УНО						1
B	6,4*	Кт	К	НО						1
V	6,0*	Кт	УК(д)	НО						1
W	5,6*	Кт	К	УНО	НизК	Р				
Cl	5,2*	Кт	ТК	НО				1	1	1
Zr	5,0	Кт	УК(взв)	УНО	НизК					
Ge	5,0	Кт	УК	ННО	ОНизК	Р, Ф				
Si	4,5	СКт	УК(чб)	НО				1	1	1
Na	4,4*	СКт	ТК	НО				1	1	1
Cs	4,2	СКт	К	УНО	ОНизК	Р, Ф				
Fe	3,9	СКт	НК (о/в)	ННО						
Pb	3,7	СКт	УК	УНО*	НизК	Ф				
Br	2,6*	СКт	К	УНО						1
Ni	2,6	СКт	УК	ННО						
Sr	2,6*	СКт	К	НО				1	1	1
Mo	2,5*	СКт	К	НО				1	1	1
Cu	2,5	СКт	УК	УНО*						
Sb	2,3*	СКт	УК	УНО	НизК					
Li	2,1*	СКт	К	НО						
Ti	2,0	СКт	УК(взв)	ННО						
Rb	1,75	НКт	К	НО				1	1	1
Zn	1,50	НКт	УК	УНО*						
K	1,46*	НКт	УК(чб)	НО				1	1	1
Ba	1,42*	НКт	К	НО						
P	1,38	ОНКт	НК(б)	УНО						
U	1,38*	ОНКт	УК	НО						
Co	1,33	ОНКт	К	УНО	НизК					
Ca	1,30*	ОНКт	К	НО						
S	1,23	ОНКт	К	ННО						
OM	1,22*	ОНКт	К	УНО						
Cr	1,10*	ОНКт	УК(взв)	ННО	НизК					
Mg	1,03*	ОНКт	К	НО						

Рис. 3. Классификация элементов по категориям контрастности, консервативности и надежности определения, выбор элементов и их групп для расчета вкладов загрязненных речных вод (*Part\_riv\_lit*) в формирование прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Тья (элементы, исключенные из расчетов выделены красным шрифтом, "1" в группах – включенный в расчет элемент)

\* **Примечание:** FC = P/Ф – фактор контрастности, отношение концентраций элементов в источниках смешения: P – р. Тья (riv), Ф – байкальская вода на фоновой станции (3к) [для отношений P/Ф < 1 взяты обратные величины].

Контрастность: **СВКт** – сверхвысоко контрастные (FC > 100), **ВКт** – высококонтрастные (FC = 10-100), **Кт** – контрастные (FC = 5-10), **СКт** – средние контрастные (FC = 2-5), **НКт** – низко контрастные (FC = 1,4-2), **ОНКт** – очень низко контрастные (FC < 1,4). \*\* – все допустимые элементы.

Консервативность: **ТК** – типично консервативный, **К** – консервативный, **УК** – условно консервативный [(орг) – мигрирующий в составе тонкодисперсных органико-минеральных коллоидов, (чб) – частично биогенный, (д) – может быть диагенетического происхождения из осадков, (взв) – частично мигрирующий в составе тонкодисперсной взвеси], **НК** – неконсервативный [(о/в) – Red/Ox зависимый, (б) – биогенный].

Надежность определения: **НО** – надежно определяется во всех объектах, **УНО** – условно надежно определяемый [значимы поправки на интерференции и/или вычитание приборного фона или низкие концентрации (< 0,1 мкг/дм<sup>3</sup>) (**НизК**) или очень низкие (< 0,01 мкг/дм<sup>3</sup>, для Sb < 0,05 мкг/дм<sup>3</sup>) (**ОНизК**) во всех объектах или в их большинстве (**НизК\***, **ОНизК\***) или **ОНизК** в источниках смешения (P и/или Ф). **УНО\*** – условно надежно определяемый [эпизодическая контаминация проб или масс-спектрометра], **ННО** – ненадежно определяемые [сложность вычитания приборного фона, большие эффекты памяти, большое количество интерференций и/или сложности их учета при пороговых концентрациях анализа].

Fig. 3. Classification of the elements by categories of contrast, conservativeness and determination reliability, selection of elements and of their groups for calculation of fractions of polluted riverine waters (*Part\_riv\_lit*) into

the formation of coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Tyya R. (excluded from calculations elements are in red, "1" in the groups means an included in the calculations element)

\* **Note:**  $FC = P/\Phi$  – contrast factor, ratio of elements concentrations in mixing sources:  $P$  – the Tyya R. (Riv),  $\Phi$  – Baikalian water at the background station (3k) [for ratios  $P/\Phi < 1$ , reversal values are taken].

Contrast: **CBKm** – ultrahigh contrast ( $FC > 100$ ), **BKm** – high contrast ( $FC = 10-100$ ), **Km** – contrast ( $FC = 5-10$ ), **CKm** – medium contrast ( $FC = 2-5$ ), **Hkm** – low contrast ( $FC = 1.4-2$ ), **OHkm** – very low contrast ( $FC < 1.4$ ). \*\* – all feasible elements.

Conservativeness: **TK** – typically conservative, **K** – conservative, **YK** – conventionally conservative [(opr) – migrating as part of finely-dispersed organic-mineral colloids, (чб) – partly biogenic, (д) – may be of diagenetic origin from sediments, (взв) – partly migrating as part of a finely-dispersed suspension], **HK** – non-conservative [(o/б) – Red/Ox dependent, (б) – biogenic].

Determination reliability: **HO** – determined reliably in all objects, **YHO** – conventionally reliably determinable [valuable corrections to interference and/or subtraction of instrumental background or low concentrations ( $< 0.1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) (**HузK**) or very low ( $< 0.01 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ , for  $\text{Sb} < 0.05 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ ) (**OHузK**) in all objects or in their major part (**HузK\***, **OHузK\***) or **OHузK** in mixing sources ( $P$  and/or  $\Phi$ )]. **YHO\*** – conventionally reliably determinable [episodic contamination of samples or of the mass-spectrometer], **HHO** – non-reliably determinable [complexity in subtraction of instrumental background, great memory effects, a large amount of interferences and/or complexity in their taking into account at threshold concentration of an analyte].

По надежности определения элементы разделены на **HO** – надежно определяемые во всех объектах (Mn, Al, B, V, Cl, Si, Na, Sr, Mo, Li, Rb, K, U, Ca, Mg); **YHO** – условно надежно определяемые (REE, Th, Y, Be, Ga, As, W, Zr, Cs, Br, Sb, P, Co, OM), для которых значимы корректировки на интерференции и/или вычитание приборного фона (обычно Ga, As, Br, Sb, P) или концентрации элементов низки ( $< 0,1 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ ) или очень низки ( $< 0,01 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ , для  $\text{Sb} < 0,05 \text{ мкг}/\text{дм}^3$ ) во всех объектах (**НизK**, **ОНизK**) или в их большинстве (**НизK\***, **ОНизK\***) или очень низки в источниках смешения (**ОНизK(P)** – в реке, **ОНизK(Ф)** – в байкальской фоновой воде); **YHO\*** – условно надежно определяемые, для которых эпизодически характерны контаминации проб или масс-спектрометра (Cu, Zn, Pb); **HHO** – ненадежно определяемые из-за сложностей вычитания приборного фона (S), больших эффектов памяти (I), большого количества интерференций и/или сложности их учета при пороговых концентрациях аналита (Fe, Ni, Ge, Ti, Cr).

Для получения корректных результатов мы исключили из расчетов все очень низко контрастные элементы (P, U, Co, Ca, S, OM, Cr, Mg), все ненадежно определяемые (I, Fe, Ni, Ge, Ti) и неконсервативные (Mn, Fe), а также **YHO\***-элементы (Cu, Zn, Pb). Учитывая суммарно все характеристики по всем категориям, из оставшихся элементов исключили еще пять элементов: Ga (**BKт** + **YK**, но **YHO** + **ОНизK\*** + **ОНизK(Ф)**), W (**Kт** + **K**, но **YHO** + **НизK** + **ОНизK(Ф)**), Zr (**Kт** + **YK(взв)**, но **YHO** + **НизK** + **ОНизK(Ф)**), Cs (**CKт** + **K**, но **YHO** + **ОНизK** + **ОНизK(P, Ф)**) и Sb (**CKт** + **YK**, но **YHO** + **НизK**). Мы также исключили Li, концентрация которого в большинстве объектов смешения достоверно выше, чем в источниках (пока не ясно с чем это связано), а также низкоконтрастный Ba, повышенная концентрация которого в прибрежных водах может быть следствием берегового влияния интерстициальных или подземных вод. Все исключенные элементы на рис. 3 / fig. 3 выделены красным шрифтом. Из оставшихся элементов в расчетах использован 21 элемент и

их суммы (La, Ce, Pr, LREE, MREE, HREE, Th, Y, Be, Al, As, B, V, Cl, Si, Na, Br, Sr, Mo, Rb, и K).

Расчеты велись отдельно по группам {1} REE, Th, Y, Be (**CBKт&BKт** + **YK(opr)** + **YHO** – 9 элементов), {2} Cl, Si, Na, Sr, Mo, Rb, K (**Kт&CKт&HKт** + **K&YK** + **HO&YHO** – 7 элементов), их суммам {1}+{2}, и по всем допустимым элементам ({1}+{2} + {Al, As, B, V, Br}).

Результаты расчетов водных вкладов загрязненных речных вод в прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья представлены в табл. 3 / tabl. 3. Из табл. 3 / tabl. 3 следует, что водные вклады загрязненных речных вод (далее – водные вклады р. Тья), рассчитанные по разным группам элементов, довольно близки, поэтому далее мы будем использовать усредненные результаты. Рассчитанные водные вклады р. Тья количественно подтверждают те закономерности, которые были сделаны ранее из анализа тепловой карты геохимических различий (см. выше, и также рис. 2 / fig. 2). Наибольший водный вклад р. Тья наблюдается в прибрежной воде в 550 м вправо от устья (86%, ст. 550 CWR), в меньшей степени в поверхностной воде в 300 м вправо от устья (26%, ст. 300 R) и в прибрежной воде в 530 м влево от устья (24%, ст. 530 CWL), что согласуется с картиной характерных геострофических течений в этом районе, которые сносят речные воды вправо от дельты реки. Прибрежные воды на окончании правой части дельты, в 2,7 км от устья, уже достаточно сильно разбавлены байкальской водой – водный вклад р. Тья в них составляет ~ 9% (ст. 2.7k CWR). На левом окончании дельты в 1,5 км от устья прибрежная вода содержит ~ 8% загрязненных речных вод (ст. Nер CWL возле лодочной станции «Нептун»). В секторе 200-300 м от уреза водный вклад р. Тья составляет ~ 7% напротив устья (ст. 200) и ~ 4% под углом влево (ст. 200 L). В секторах 500-600 и 800 м от уреза поверхностная вода почти полностью байкальская, водный вклад р. Тья там составляет не более 0,5%.

Таблица 3

Вклад (в %) загрязненных речных вод (*Part\_riv\_lit*) и сточных вод (*Part\_ww\_lit*) в прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья и сточных вод КОС г. Северобайкальска

Table 3

Fractions of polluted riverine waters (*Part\_riv\_lit*) and waste waters (*Part\_ww\_lit*) in coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of Tyua River and waste waters from Severobaikalsk town WTF

Группа // Group	Параметры и результаты расчета // Parameters and results of calculation	550	530	2.7k	Неп	300	200	200	630	500	600	800
		CWR	CWL	CWR	CWL	R	R	L	R	R	L	R
		Прибрежная зона // Coastal zone				Сектор 200-300 м // Sector of 200-300 m			Сектор 500-600 м // Sector of 500-600 m			800 м
{1}: REE, Th, Y, Be	N	8	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
	Искл. // Exc.	<b>Th</b>										
	<i>Part_riv_lit</i> {1}	<b>71</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>7,5</b>	<b>23</b>	<b>6,9</b>	<b>3,8</b>	<b>0,053</b>	<b>0,18</b>	<b>0,096</b>	<b>0,047</b>
	Δ, %	11	23	30	24	9,2	12	14	30	16	37	18
{2}: Cl, Si, Na, Sr, Mo, Rb,K	N	6	6	7	5	7	7	7	7	7	7	7
	Искл. // Exc.	Cl	Cl		Cl, K							
	<i>Part_riv_lit</i> {2}	<b>99</b>	<b>25</b>	<b>4,3</b>	<b>8,8</b>	<b>32</b>	<b>5,7</b>	<b>4,0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1,4</b>	<b>0</b>
	Δ, %	1,9	10	4,7	9,2	3,1	3,2	3,2	1,9	3,3	2,4	2,0
{1}+{2}	N	14	15	16	14	16	16	16	16	16	16	16
	Искл. // Exc.	<b>Th, Cl</b>	<b>Cl</b>		<b>Cl, K</b>							
	<i>Part_riv_lit</i> {1}+{2}	<b>86</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>7,5</b>	<b>24</b>	<b>6,8</b>	<b>3,8</b>	<b>0,052</b>	<b>0,18</b>	<b>0,10</b>	<b>0,047</b>
	Δ, %	23	19	23	20	9,1	9,5	11	22	13	28	14
{все** // all}: {1}+{2}+ {Al, As, B, V, Br}	N	18	20	21	19	21	21	21	21	21	21	21
	Искл. // Exc.	<b>Th, Cl, B</b>	<b>Cl</b>		<b>Cl, K</b>							
	<i>Part_riv_lit</i> {все** // all}	<b>87</b>	<b>24</b>	<b>10</b>	<b>7,7</b>	<b>25</b>	<b>6,9</b>	<b>3,8</b>	<b>0,054</b>	<b>0,18</b>	<b>0,10</b>	<b>0,047</b>
	Δ, %	22	21	24	24	14	11	12	20	11	24	12
Среднее // Average	<i>Part_riv_lit</i> (aver)	<b>86</b>	<b>24</b>	<b>8,7</b>	<b>7,9</b>	<b>26</b>	<b>6,6</b>	<b>3,8</b>	<b>0,040</b>	<b>0,13</b>	<b>0,42</b>	<b>0,035</b>
	Error_Part_riv_lit (aver), RSD%	14	3,3	33	8,0	16	9,3	2,9	67	67	154	67
Точность // Accuracy	<i>Part_ww_lit</i> (aver)	<b>0,036</b>	<b>0,010</b>	<b>0,004</b>	<b>0,003</b>	<b>0,011</b>	<b>0,003</b>	<b>0,002</b>	<b>2*E-5</b>	<b>1*E-4</b>	<b>2*E-4</b>	<b>1*E-5</b>
	Error_Part_ww_lit (aver), RSD%	26	22	40	23	27	24	22	70	70	155	70

**Примечания:** \* – формирование групп элементов описано в тексте и показано на рис. 3 / fig. 3; N – количество элементов в группе; Δ, % – среднеквадратичное отклонение расчетных и измеренных концентраций элементов в объекте смешения, показывает качество расчета *Part\_riv\_lit*, (чем меньше, тем лучше); \*\* – все допустимые элементы; Искл. – элемент исключен из расчета, поскольку не удовлетворяет граничным условиям: его концентрация достоверно выше (выделено жирным шрифтом) или ниже (выделено не жирным шрифтом), чем в источниках смешения.

**Notes:** \* – the formation of elements groups is described in the text and is shown in the Fig. 3; N is elements number in a group; Δ, % is standard deviation of calculated and measured elements concentrations in a mixing object, it shows the quality of calculation of *Part\_riv\_lit* (the less, the better); \*\* – all allowable elements; Искл. – the element is excluded from the calculation as it does not meet boundary conditions: its concentration is certainly higher (bold font) or lower (non-bold font) than in the mixing sources.

Более наглядно полученные результаты представлены на рис. 4 / fig. 4 и рис. 5 / fig. 5. На рис. 4 / fig. 4 показана кластерная диаграмма геохимических различий исследуемых объектов, рассчитанная методом Варда [22] по всем допустимым элементам (группа {все\*\*}) с указанием водного вклада р Тья. Объекты

разделились на два основных кластера по несколько групп в каждом. Кластер {1} образуют интерстициальная вода {1}, речная вода {2a} и прибрежная вода с высоким вкладом речных вод (86%) на ст. 550 CWR в 550 м вправо от устья {26}.

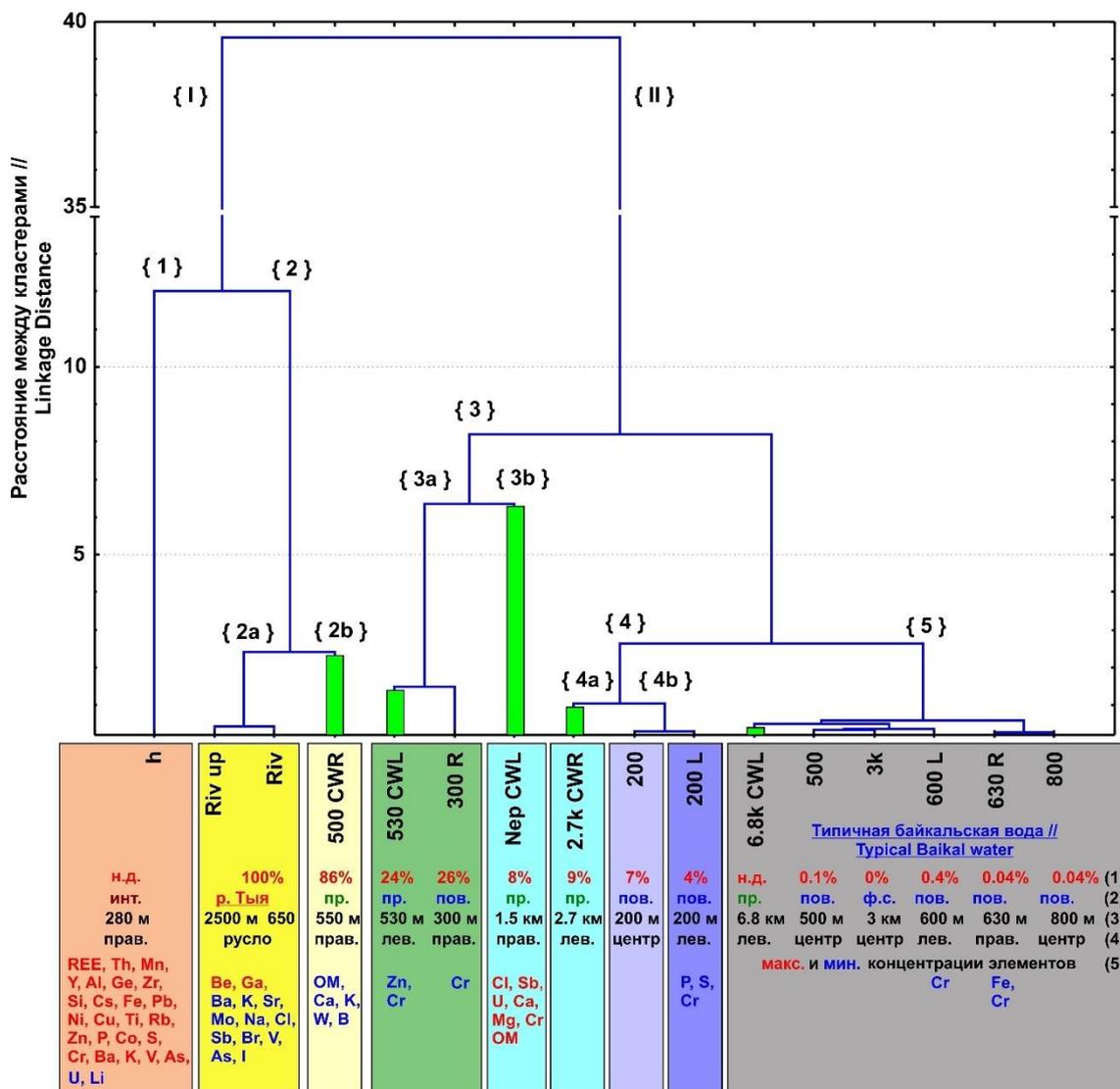


Рис. 4. Кластерная диаграмма геохимических различий основных источников (загрязненная речная вода, фоновая байкальская вода в фотическом слое в 3 км от уреза) и объектов смешения в литорали Байкала в зоне влияния р. Тья, а также прибрежной воды вне зоны ее влияния по 21 химическому элементу (REE, Th, Y, Be, Al, As, B, V, Cl, Si, Na, Br, Sr, Mo, Rb, K, см. рис. 3 / fig. 3), использованному для расчета водного вклада р. Тья (см. табл. 3 / tabl. 3)

\* **Примечание:** Кластерный анализ выполнен в программе Statistica 10 методом Варда с евклидовыми расстояниями между кластерами. В цветных прямоугольниках указаны (1) водный вклад р. Тья (в %); (2) тип воды: инт. – интерстициальная, пр. – прибрежная, пов. – поверхностная, ф.с. – фотический слой Байкальских фоновых вод; (3) расстояние от устья реки, (4) направление от устья реки: русло – по руслу реки выше устья, центр – литораль напротив устья, лев. – литораль влево от устья (по течению реки), прав. – литораль вправо от устья; (5) максимальные (красный шрифт) и минимальные (синий шрифт) концентрации элементов в объектах. Зелеными толстыми линиями в группах выделены кластерные расстояния для прибрежной воды. Цифрамы в фигурных скобках обозначены основные кластеры (римские цифры), и кластерные группы (арабские цифры).

Fig. 4. A cluster diagram of geochemical differences of main sources (polluted riverine water, background Baikalian water in the photic layer in 3 km from water edgea) and of mixing objects in Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Tyua R. as well as of coastal zone out of the zone of its influence by 21 chemical elements (REE, Th, Y, Be, Al, As, B, V, Cl, Si, Na, Br, Sr, Mo, Rb, K, see Fig. 3) used for calculation of the Tyua R. water fraction (see Tabl. 3.)

\* **Note:** Cluster analysis is done using the software Statistica 10 by Ward – method with Euclidean distances between the clusters. In the colored rectangles there are: (1) water fraction of the Tyua R. (in %); (2) water type: *um.* – interstitial, *np.* – coastal, *nos.* – surface, *ф.с.* – photic layer of Baikalian background water; (3) distance from the river mouth, (4) direction from the river mouth: *русло* – along the river bed above the mouth, *центр* – littoral opposite to the mouth, *лев.* – littoral to the left from the mouth (along the river current), *прав.* – littoral to the right from the mouth; (5) maximal (red font) and minimal (blue font) concentrations of the elements in the objects. Green thick lines in the groups show cluster distances for coastal water. Figures in curly brackets mean main clusters (Roman numbers) and cluster groups (Arabic numbers).



**Рис. 5. Тенденции изменения водного вклада загрязненных речных вод (желтая полупрозрачная заливка) и хлора сточных вод (сиреневая заливка) в прибрежные и поверхностные воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья**

\* **Примечание:** Круглыми символами отмечены станции отбора проб: желтые – речная вода, черный – труба сброса сточных вод КОС г. Северобайкальска, коричневый – интерстициальная вода, синие – прибрежная вода, розовые – поверхностная вода. Зеленая звездочка – устье основной протоки р. Тья. В устье р. Тья условными размерами кругов отмечены масштабы влияния: желтый круг – 100% речная вода, темно-сиреневый круг – вклад хлора сточных вод (29%), на станциях в литорали их вклады обозначены желтыми и красными цифрами, соответственно. Пунктирными стрелками обозначены направления геострофических течений.

**Fig. 5. Trends in change of water fraction of polluted riverine waters (yellow semitransparent painting) and of chlorine from waste waters (lilac painting) into coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of the Tyua R.**

\* **Note:** Round symbols mark sampling stations: yellow ones – riverine water, black one – discharge pipe of WTF waste waters from Severobaikalsk town, brown one – interstitial water, blue ones – coastal water, pink ones – surface water. A green asterisk – mouth of main duct of the Tyua R. In the Tyua R. mouth, conventional circle sizes mark influence scales: a yellow circle – 100% riverine water, a dark lilac circle – fraction of chlorine from waste waters (29%), at the stations in the littoral their fractions are marked with yellow and red numbers, respectively. Dashed arrows mark directions of geostrophic currents.

Кластер {II} образуют станции с преобладанием байкальской воды. В группу {3} входят станции с водным вкладом р. Тья 24-26% (ст. 530 CWL и ст. 300 R, подгруппа {3a}), и прибрежная вода вблизи лодочной станции «Непгун» (ст. Nер CWL, {3b}), где водный

вклад р. Тья почти в три раза ниже (~8%). Статистически данная станция попала в группу {3}, вероятно, из-за максимальной концентрации Cl и повышенной концентрации K. Общая минерализация и концентрации Sb, U, Ca, Mg, Cr в этой воде также максимальны, а концентрация Ba одна из самых высоких (см. табл. 2 /

tabl. 2), что указывает на влияние грунтовых вод и, вероятно, антропогенного фактора. В следующую группу {4} входят станции с водным вкладом р. Тья в пределах ~ 4-9%. Это прибрежная вода на станции 2.7k CWR на правом краю дельты в 2,7 км от устья ({4a}, ~ 9%) и поверхностная вода в литорали Байкала в секторе 200 м от уреза напротив и влево от устья (подгруппа {4b}, ~ 4-7%). В наиболее многочисленную подгруппу {5}, которую условно можно обозначить как «Типичная байкальская вода», входят станции с минимальным водным вкладом р. Тья (< 0,5%) – поверхностные воды литорали Байкала в секторах 500-600 и 800 м от уреза, а также фотический слой на фоновой станции (ст. 3k) и прибрежная вода вне зоны влияния р. Тья – в 6,8 км влево от устья на окончании г. Северобайкальска (ст. 6.8k CWL).

На рис. 5 / fig. 5 представлен космоснимок с наложением тенденций изменения водных вкладов загрязненных речных вод (желтая полупрозрачная заливка) и хлора сточных вод (сиреневая заливка) в прибрежных и поверхностных водах литорали Байкала в зоне влияния р. Тья.

Очевидно, что геохимические вклады (ГХВ) по отдельным компонентам сточных вод могут быть как больше, так и меньше, чем водный вклад сточных вод. Это зависит от степени загрязненности сточных вод относительно объектов смешения. ГХВ представляет собой долю химического элемента сточных вод от общего содержания данного элемента в объекте смешения и рассчитывается с учетом возможного неконсервативного поведения элементов на физико-химических и биогеохимических барьерах [14]:

$$ГХВ = Part_{ww} \times C_{i\_ww} / C_{i\_расчет} \quad (12),$$

где  $C_{i\_расчет}$  – концентрация элемента  $i$  в объекте смешения, рассчитанная по (6) с учетом полученных водных вкладов от основных источников смешения (см. табл. 3 / tabl. 3).

Геохимические вклады сточных вод г. Северобайкальска в состав р. Тья и в состав прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Тья представлены на рис. 6 / fig. 6 в виде тепловой карты и ранжированы по убыванию в секторе ~ 300 м от уреза.

Из полученных данных следует, что максимальное влияние сточных вод на р. Тья проявляется по Cl (29%). Далее в порядке уменьшения: двумя рангами ниже по P (~7%), затем по Na (~4%), затем по Zn (~3%), затем по Sb (1,3%), В (1,2%) и К (1,1%). Вклады по остальным элементам составляют менее 1%.

В прибрежной зоне, за исключением ст. 550 CWR, влияние сточных вод по P (0,77-2,2%) немного выше, чем по Cl (0,47-1,7%). На ст. 550 CWR, где речные воды преобладают (водный вклад 86%), вклады элементов сточных вод уменьшаются в той же последовательности, что и в устье: по Cl (16%), рангом ниже по P (~7%), затем двумя рангами ниже по Na (2,4%) и Zn

(2,4%). Вклады по остальным элементам на всех прибрежных станциях составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%.

В секторе ~ 200-300 м от уреза наибольшее влияние сточных вод проявляется по P (0,38-2,4%) и Cl (0,22-1,8%). Вклады по остальным элементам составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%.

В секторе ~ 500-600 м от уреза и в 800 м от уреза геохимическое влияние сточных вод минимальное – вклады по элементам не превышают 0,1%, в подавляющем большинстве случаев менее 0,01%. Наибольшее влияние сточных вод проявляется по Mn (0,006-0,07%), P (0,004-0,04%) и Cl (0,002-0,02%).

Вклад сточных вод по Mn при переходе от речных вод к прибрежным и поверхностным в секторе 200-300 м от уреза меняется в небольших пределах (0,54-0,31%), а далее резко падает до <0,1%.

На рис. 6 / fig. 6 также показаны суммарные геохимические вклады сточных вод КОС г. Северобайкальска по всем информативным элементам (СГХВ) (41 элемент) и элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [6] (СГХВ Пр. № 83). Из числа 35 нормируемых элементов были исключены малоинформативные (Se, Cd, Sn, Te) и Hg, которая в низких концентрациях (<0,1 мкг/дм<sup>3</sup>) методом ИСП-МС определяется ненадежно.

Наибольшим СГХВ характеризуется р. Тья – 53% и прибрежная вода на ст. 550 CWR – 35%, где наблюдается высокий водный вклад р. Тья (86%). На остальных прибрежных станциях СГХВ небольшой и составляет 2,8-7,5%. В секторе 200-300 м от уреза СГХВ сопоставим с прибрежным сектором и составляет 1,5-8,1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза СГХВ минимальный – 0,07-0,21%.

Основной вклад в первые ~ 80% СГХВ вносят: в р. Тья и на ст. 550 CWR – Cl (54-45%), P (14-19%), Na (7,8-7,0%) и Zn (5,0-6,96%); на остальных станциях литорали Байкала в прибрежной зоне – P (27-29%), Cl (17-22%), Zn (~ 11%), Mn (6,6-14%), Cs (3,3-4,0%), Na (2,8-3,7%), Rb (2,8-2,9%) и K (2,1-2,6%); в секторе 200-300 м от уреза – P (25-29%), Cl (15-23%), Zn (~ 9,9-11,3%), Mn (6,1-20%), Cs (3,2-4,0%), Na (2,4-3,8%), Rb (2,6-2,9%), K (1,9-2,6%) и Ga (2,1-2,4% на станциях 200 и 200 L). В секторах 500-600 и 800 м от уреза состав основных загрязнителей почти тот же, что и в секторе 200-300 м от уреза, однако наибольший вклад в СГХВ вносит Mn (32-34%). Вклады в СГХВ других элементов составляют: P (19-20%), Cl (~11%), Zn (~ 7,5-7,9%), Cs (3,4-3,6%), Ga (2,6-2,7%), Rb (2,0-2,1%) и Na (1,8-1,9%). Дополнительно, в сумму первых 80% СГХВ также попадает Se (1,5-2,0%).

Поскольку большинство нормируемых элементов (выделено зеленой заливкой на рис. 6 / fig. 6) входит в состав информативных элементов, то СГХВ Пр. № 83 по абсолютным значениям мало отличаются от СГХВ. Состав и вклады основных загрязнителей, входящих в первые ~ 80% СГХВ Пр. № 83 почти такие же как и для СГХВ.

Зона // Zone	Устье Mouth	Прибрежная зона // Coastal zone				Сектор 200-300 м // Sector of 200-300 m			Сектор 500-600 м // Sector of 500-600 m			800 м
		Станция // Station	550 CWR	530 CWL	2.7k CWR	Нер CWL	300 R	200	200 L	630 R	500	
Part_ww, %	0,042	0,036	0,010	0,004	0,003	0,011	0,003	0,002	2*E-5	1*E-4	2*E-4	1*E-5
ГХВ error ± rel. %	22-38	29-55	22-38	40-55	22-43	28-43	24-44	22-46	70-84	70-84	155-167	70-84
P	7,3	6,5	2,2	0,85	0,77	2,4	0,64	0,38	<0,01	0,013	0,042	<0,01
Cl	29	16	1,7	0,52	0,47	1,8	0,39	0,22	<0,01	<0,01	0,023	<0,01
Zn	2,7	2,4	0,85	0,33	0,30	0,92	0,25	0,15	<0,01	<0,01	0,017	<0,01
Mn	0,54	0,54	0,49	0,41	0,40	0,50	0,38	0,31	<0,01	0,023	0,066	<0,01
Na	4,2	2,4	0,27	0,087	0,079	0,31	0,065	0,037	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cs	0,43	0,41	0,24	0,12	0,11	0,26	0,098	0,062	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Rb	0,61	0,56	0,22	0,087	0,080	0,23	0,067	0,040	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
K	1,1	0,87	0,19	0,066	0,060	0,21	0,050	0,029	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sb	1,3	1,0	0,16	0,054	0,049	0,18	0,040	0,023	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cr	0,45	0,38	0,100	0,036	0,033	0,11	0,027	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pb	0,18	0,17	0,096	0,047	0,043	0,10	0,037	0,023	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Fe	0,17	0,16	0,093	0,046	0,042	0,098	0,036	0,023	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ni	0,18	0,17	0,083	0,037	0,033	0,088	0,028	0,017	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ga	0,11	0,10	0,085	0,059	0,056	0,087	0,051	0,037	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cu	0,16	0,15	0,071	0,031	0,028	0,075	0,024	0,015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Br	0,61	0,42	0,065	0,021	0,019	0,072	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
S	0,22	0,20	0,062	0,023	0,021	0,067	0,018	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ge	0,10	0,099	0,063	0,033	0,031	0,065	0,027	0,017	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Co	0,20	0,18	0,060	0,023	0,021	0,065	0,017	0,010	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ti	0,15	0,14	0,059	0,024	0,022	0,063	0,019	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
B	1,2	0,57	0,055	0,017	0,016	0,062	0,013	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Si	0,090	0,086	0,052	0,027	0,025	0,055	0,021	0,014	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
OM	0,21	0,17	0,042	0,015	0,013	0,046	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
V	0,83	0,42	0,041	0,013	0,012	0,046	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Zr	0,069	0,067	0,042	0,022	0,021	0,044	0,018	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mg	0,099	0,085	0,023	<0,01	<0,01	0,025	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Al	0,032	0,031	0,023	0,014	0,013	0,024	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ca	0,095	0,078	0,018	<0,01	<0,01	0,020	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Th	0,021	0,021	0,020	0,017	0,016	0,020	0,015	0,013	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
As	0,37	0,18	0,016	<0,01	<0,01	0,018	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mo	0,13	0,091	0,014	<0,01	<0,01	0,016	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
I	0,37	0,15	0,013	<0,01	<0,01	0,015	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Li	0,098	0,072	0,013	<0,01	<0,01	0,014	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Sr	0,088	0,062	<0,01	<0,01	<0,01	0,011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ce	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ba	0,042	0,034	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
HREE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Y	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
LREE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
W	0,085	0,044	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
MREE	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Be	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
U	0,021	0,017	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
La	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Pr	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
СГХВ, %	53	35	7,5	3,1	2,8	8,1	2,4	1,5	0,021	0,070	0,21	0,019
Error ± rel. %	13	22	9,1	16	9,1	11	9	8,6	29	29	63	29
СГХВ Пр. № 83, %	52	33	7,0	2,9	2,6	7,7	2,2	1,4	0,019	0,062	0,19	0,017
Error ± rel. %	13	23	10	17	10	12	10	9,3	33	33	70	33

Рис. 6. Тепловая карта геохимических вкладов (ГХВ, в %) сточных вод г. Северобайкальска в состав р. Тья и в состав воды литорали Байкала в зоне влияния р. Тья в сопоставлении с водными вкладами сточных вод (Part\_ww)

\* **Примечание:** СГХВ – суммарные геохимические вклады по всем компонентам, СГХВ Пр. № 83 – суммарные геохимические вклады по элементам, нормируемым Приказом № 83 Минприроды [7]. OM – общая минерализация.

Fig. 6. Heat map of geochemical fractions (ГХВ, %) of Severobaikalsk town wastewaters in the composition of Tyya R. and in the coastal and surface waters of Lake Baikal littoral in the zone of influence of Tyya R. compared to water fractions of wastewaters (Part\_ww)

\* **Note:** СГХВ – summary geochemical fractions by all components, СГХВ Пр. № 83 – summary geochemical fractions by elements according to the Order No 83 of Ministry of Natural Resources [7]. OM – total mineralization.

ГХВ сточных вод // ГХВ of wastewaters	
> 50%	1-2%
30-50%	0,5-1%
20-30%	0,3-0,5%
10-20%	0,2-0,3%
5-10%	0,1-0,2%
3-5%	0,01-0,1%
2-3%	< 0,01%

### Заклучение

С помощью геохимического метода определены водные и геохимические вклады сточных вод КОС г. Северобайкальска в состав р. Тья и в состав прибрежных и поверхностных вод литорали Байкала в зоне влияния р. Тья. В литоральных водах также определены водные вклады основных источников: сточные, речные и фоновые байкальские воды.

Установлено, что водный вклад сточных вод КОС г. Северобайкальска в общий речной сток р. Тья очень мал (~0,04%) вследствие большой водности самой реки.

Водный вклад р. Тья в литорали Байкала составляет 86-8% в прибрежной зоне (~ 1 м от уреза и на удалении до 2,7 км латерально от устья), в поверхностной воде напротив основной протоки – 26-4% в секторе 200-300 м от уреза и менее 0,5% в секторах 500-600 и 800 м от уреза. Соответствующие доли сточных вод в литорали Байкала составляют 0,036-0,003%, 0,011-0,002% и менее 0,0002% соответственно. В прибрежной зоне и в секторе 200-300 м от уреза наибольшая доля речных вод наблюдается в правой части от основной протоки, что обусловлено их сносом в соответствии с направлением геострофических течений в этом районе.

Из исследованных объектов наибольшему геохимическому влиянию сточных вод КОС г. Северобайкальска подвергается р. Тья и прибрежная вода в литорали Байкала в 550 м вправо от устья основной протоки, где водный вклад речных вод максимальный (86%). В этих объектах суммарный геохимический вклад сточных вод, рассчитанный по 41 информативному химическому элементу (СГХВ), составляет 53 и 35% соответственно. На остальных станциях в литорали Байкала в прибрежной зоне СГХВ небольшой и составляет 2,8-7,5%. В секторе 200-300 м от уреза СГХВ сопоставим с прибрежной зоной и составляет 1,5-8,1%. В секторах 500-600 и 800 м от уреза СГХВ минимальный – 0,07-0,21%.

В р. Тья основным загрязняющим элементом сточных вод является Cl – его геохимический вклад составляет 29%, высокие вклады также характерны для P (~7%), Na (~4%), Zn (~3%), Sb (1,3%), B (1,2%) и K (1,1%). Вклады по остальным элементам менее 1%. Наибольшее геохимическое влияние сточных вод в прибрежной зоне проявляется по Cl (16-0,47%) и P (7-0,77%), в меньшей степени по Na (2,4-0,1%) и Zn (2,4-0,33%), вклады по остальным элементам составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%. В секторе ~ 200-300 м от уреза наибольшее влияние сточных вод проявляется по P (0,38-2,4%) и Cl (0,22-1,8%), вклады по остальным элементам составляют менее 1%, в большинстве случаев – менее 0,1%. В секторах ~ 500-600 м и 800 м от уреза геохимическое влияние сточных вод минимальное – вклады по элементам от сточных вод не превышают 0,1%, в подавляющем большинстве случаев менее 0,01%. Наибольшее влияние сточных вод здесь заметно по Mn (0,006-0,07%), P (0,004-0,04%) и Cl (0,002-0,02%).

Учитывая все рассмотренные показатели можно заключить, что основное влияние загрязненных вод р. Тья на прилегающую литораль Байкала ограничено сектором 200-300 м от уреза во фронтальном направлении, и далее, к границам сектора 500-600 м от уреза,

сильно падает, однако в прибрежной зоне распространяется за пределы дельты (далее 2,7 км вправо и 1,5 км влево от устья основной протоки).

Прибрежная вода вне зоны влияния р. Тья (за северной оконечностью г. Северобайкальска) по большинству информативных элементов неотличима от байкальской воды на фоновой станции, однако повышенное содержание ряда элементов (REE, Ga, Al, Si, Fe, Pb, Ni, Cu, P, Li и Sb) свидетельствует о береговом влиянии (абразия берегов, площадной смыв, дренаж интерстициальных вод).

В сточных водах КОС г. Северобайкальска обнаружено превышение нормативов по P (69 ПДК), Mn (6 ПДК), Zn (3,4 ПДК), Cu (2,1 ПДК), Mo (1,7 ПДК) и V (1,3 ПДК) из 35 химических элементов, установленных для сточных вод, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной и буферной экологических зон Байкальской природной территории.

### Сведения об авторском вкладе

Е.П. Чебыкин – отбор и многоэлементный ИСП-МС анализ проб воды; сбор и анализ научных публикаций; разработка геохимического метода для решения поставленных задач; подготовка графического материала и сводного варианта рукописи, итоговые выводы.

Н.Н. Куликова – полевые работы; развитие концепции биогеохимических исследований; подготовка отдельных частей рукописи.

Е.В. Лихошвай – научное руководство; постановка задач; организация экспедиции; редактирование рукописи; итоговые выводы.

А.Н. Сутурин – научное руководство; концепция исследований; итоговые выводы.

### Contribution of the authors

E.P. Chebykin – sampling and multi-element ICP-MS analysis of water samples; search and analysis of scientific publications; development of a geochemical method for solving the tasks set; preparation of graphic material and writing of the manuscript, final conclusions.

N.N. Kulikova – field work; development of the concept of biogeochemical research; writing individual parts of the manuscript.

Ye.V. Likhoshway – scientific management; problem statement; organization of the expedition; editing the manuscript; final conclusions

A.N. Sutin – scientific management; research concept; final conclusions.

### Список источников

1. Беркин Н.С., Макаров А.А., Русинек О.Т. Байкаловедение. Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2009. 291 с.
2. Верболов В.И. Течения и водообмен в Байкале // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 413-423.
3. Грачев М.А. Что грозит Байкалу? // В мире науки. 2015. № 1. С. 4-15.
4. Гавшин В.М., Бобров В.А., Богданов Ю.А. Урановые аномалии в глубоководных отложениях озера Байкал // Доклады академии наук. 1994. Т. 34. № 3. С. 356-359.

5. Мышляева Л.В., Краснощечков В.В. Аналитическая химия кремния (серия «Аналитическая химия элементов»). М: Наука, 1972. 212 с.
6. Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал: приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ № 83 от 21.02.2020 г.
7. Пампура В.Д., Сандимиров И.В., Медведева С.А., Улыбушева Е.И., Черная Л.И., Сандимирова Г.П., Арсентьева А.Г., Поповская Г.И. Изотопный состав урана и тория органической фракции донных осадков озера Байкал // Геохимия. 1996. № 4. С. 357-369.
8. Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Ханаев И.В., Минаев А.В., Минаев В.В. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка) // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 43-54. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54))
9. Тимошкин О.А., Мальник В.В., Сакирко М.В., Бодедкер К. Экологический кризис на Байкале: учёные ставят диагноз // Наука из первых рук. 2014. Т. 59. № 5. С. 75-91.
10. Тимошкин О.А., Сакирко М., Анненков В., Чебыкин Е., Непокрытых А., Зайцева Е., Шевелёва Н., Мальник В., Лухнёв А, Иванов Е., Короткоручко В. Байкал: экология. О чрезвычайной ситуации в районе Северобайкальска // Аргументы недели. Вып. от 13.03.2014. 2014. С. 16-17.
11. Ханаев И.В., Дзюба Е.В., Кравцова Л.С., Грачев М.А. Влияние массового развития зеленых нитчатых водорослей на воспроизводство желтокрылки *Cottocomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottidae) в условиях экологического кризиса озера Байкал // Доклады РАН. 2016. Т. 467. № 1. С. 119-121. <https://doi.org/10.7868/S0869565216070306>
12. Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Воднева Е.Н., Рассказов С.В., Ходжер Т.В., Грачев М.А. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. Т. 20. № 5. С. 613-631.
13. Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Геохимический метод оценки влияния загрязненных стоков на водные объекты на примере г. Слюдянка, р. Похабиха и Южного Байкала // Геосферные исследования. 2024, в печати.
14. Чебыкин Е.П., Куликова Н.Н., Лихошвай Е.В., Сутурин А.Н. Загрязнение поверхностных вод литорали оз. Байкал в зоне влияния сточных вод КОС г. Байкальска: оценка геохимическим методом // Геосферные исследования. 2024, в печати.
15. Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2023 года (с учетом итогов Всероссийской переписи населения 2020 г.). Федеральная служба государственной статистики РФ. URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul\\_MO\\_2023.xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xls) (дата обращения: 22.11.2023).
16. Aries S., Valladon M., Polve M., Dupre B. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples // Geostandards Newsletter. 2000. Vol. 24. № 1. pp. 19-31. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x>
17. Bagard M.L., Chabaux F., Pokrovsky O.S., Viers J., Prokushkin A.S., Stille P., Rihs S., Schmitt A.D., Dupre B. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. Vol. 75. pp. 3335-3357. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.024>
18. Geyh M.A., Schleicher H. Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application. Heidelberg: Springer Berlin. 1990. 503 p.
19. Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. pp. 3239-3260. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.008>
20. Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N., Semenov A.R., Lozhkin V.I., Petrov L.L. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water // Spectrochimica Acta Part B. 2003. Vol. 58. pp. 277-288. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X)
21. Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M., Moore M.V., Belykh O.I., Malnik V.V., Sakirko M.V., Shirokaya A.A., Bondarenko N.A., Domysheva V.M., Fedorova G.A., Kochetkov A.I., Kuzmin A.V., Likhnev A.G., Medvezhonkova O.V., Nepokrytykh A.V., Pasyukova E.M., Poberezhnaya A.E., Potapskaya N.V., Rozhkova N.A., Sheveleva N.G., Tikhonova I.V., Timoshkina E.M., Tomberg I.V., Volkova E.A., Zaitseva E.P., Zvereva Yu.M., Kupchinsky A.B., Bukshuk N.A. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // Journal of Great Lakes Research. 2016. № 42. pp. 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>
22. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American Statistical Association. 1963. Vol. 58. pp. 236-244.

## References

- Berkin, N., Makarov, A. and Rusinek, O., 2009. *Baikalovedenie* [Baikal studies]. Irkutsk, Irkutsk State University Publishing house. 291 p. (In Russian)
- Verbolov, V., 1996. Tcheniya i vodoobmen v Baikale [Currents and Water Exchange in Lake Baikal]. *Water Resources*. 23(4), pp. 381-391. (In Russian)
- Grachev, M., 2015. Chto grozit Baikalu? [What threatens Baikal?]. *In the World of Science*. 1, pp. 4-15. (In Russian)
- Gavshin, V., Bobrov, V. and Bogdanov, Yu., 1994. Uranovye anomalii v glubokovodnykh otlozheniyakh ozera Baikal [Uranium anomalies in deep-sea sediments of Lake Baikal]. *Doklady Earth Sciences*. 34(3), pp. 356-359. (In Russian)
- Myshlyaeva, L. and Krasnoshechekov, V., 1972. *Analiticheskaya khimiya kremniya (seriya «Analiticheskaya khimiya elementov»)* [Analytical chemistry of silicon (series "Analytical chemistry of elements")]. Moscow, Publishing house "Nauka". 212 p. (In Russian)
- Ob utverzhdenii normativov predel'no dopustimyykh vozdeystvii na unikal'nyu ekologicheskuyu sistemu ozera Baikal i perechnya vrednykh veshchestv, v tom chisle

veshchestv, odnosyashchikhsya k kategoriyam osobo opasnykh, vysokoopasnykh, opasnykh i umerenno opasnykh dlya unikal'noi ekologicheskoi sistemy ozera Baikal [On Approval of the Standards of maximum permissible impacts on the Unique Ecological system of Lake Baikal and the List of harmful Substances, including substances belonging to the categories of especially dangerous, highly dangerous, dangerous and moderately dangerous for the unique ecological system of Lake Baikal]. Decree of Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation № 83 from 21.02.2020. (In Russian)

7. Pampura, V., Sandimirov, I., Medvedeva, S., Ulybusheva, E., Chernaya, L., Sandimirova, G., Arsen'teva, A. and Popovskaya, G., 1996. Isotopic composition of uranium and thorium in the organic fraction of bottom sediments of Lake Baikal. *Geochemistry International*. 34(4), pp. 318-329. (In Russian)

8. Suturin, A., Chebykin, E., Mal'nik, V., Khanaev, I., Minaev, A. and Minaev, V., 2016. Rol' antropogennykh faktorov v razvitiy ekologicheskogo stressa v litorali oz. Baikal (akvatoriya pos. Listvyanka) [The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape)]. *Geography and Natural Resources*. 6, pp. 43-54. [https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-6(43-54)) (In Russian)

9. Timoshkin, O., Malnik, V., Sakirko, M. and Boedeker K., 2015. Ecological crisis on Lake Baikal: diagnosed by scientists. *Science First Hand*, 2(41), pp. 25-41. (In Russian)

10. Timoshkin, O., Sakirko, M., Annenkov, V., Chebykin, E., Nepokrytykh, A., Zaytseva, E., Sheveleva, N., Mal'nik, V., Lukhnev, A., Ivanov, E. and Korotkoruchko, V., 2014. Baikal: ekologiya. O chrezvychainoi situatsii v raione Severobaikal'ska [Baikal: ecology. About the emergency situation in the Severobaikalsk area]. *Arguments of the Week*. Iss. dated 03.13.2014. pp. 16-17. (In Russian)

11. Khanaev, I., Dzyuba, E., Kravtsova, L., Grachev, M., 2016. The effect of bloom of filamentous green algae on the reproduction of yellowfin sculpin *Cottomephorus grewingkii* (Dybowski, 1874) (Cottoidae) during ecological crisis in Lake Baikal. *Doklady Biological Sciences*, 467(1), pp. 63-64. <https://doi.org/10.1134/S0012496616020022> (In Russian)

12. Chebykin, E., Sorokovikova, L., Tomberg, I., Vodneva, E., Rasskazov, S., Khodzher, T. and Grachev, M., 2012. Sovremennoe sostoyanie vod r. Selengi na territorii Rossii po glavnym komponentam i sledovym elementam [Modern state of water in the Selenga river at the territory of Russia over major components and trace elements]. *Chemistry for Sustainable Development*. 20(5), pp. 613-631. (In Russian)

13. Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Ye. and Suturin, A., 2024. Geokhimicheskii metod otsenki vliyaniya zagryaznennykh stokov na vodnye ob"ekty na primere g. Slyudyanka, r. Pokhabikha i Yuzhnogo Baikala [Geochemical method of assessment of the impact of polluted drains onto water bodies illustrated by Slyudyanka City, the Pokhabikha River and South Baikal]. *Geosphere Research*, in press. (In Russian)

14. Chebykin, E., Kulikova, N., Likhoshway, Ye., Suturin, A., 2004. Zagryaznenie poverkhnostnykh vod litorali oz. Baikal v zone vliyaniya stochnykh vod KOS g. Baikal'ska: otsenka geokhimicheskim metodom [Pollution of Lake Baikal littoral surface waters in the zone of influence of waste water from the Baikalsk town wastewater treatment facilities: assessment by geochemical method]. *Geosphere Research*, in press. (In Russian)

15. The number of permanent population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2023 (taking into account the results of the All-Russian Population Census of 2020). *Federal State Statistics Service of the Russian Federation*. Available from: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul\\_MO\\_2023.xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Bul_MO_2023.xls) [Accessed 12th May 2023]. (In Russian)

16. Aries, S., Valladon, M., Polve, M. and Dupre, B., 2000. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples. *Geostandards Newsletter*, 24(1), pp. 19-31. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x>

17. Bagard, M., Chabaux, F., Pokrovsky, O., Viers, J., Prokushkin, A., Stille, P., Rihs, S., Schmitt, A. and Dupre, B., 2011. Seasonal variability of element fluxes in two Central Siberian rivers draining high latitude permafrost dominated areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, pp. 3335-3357. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.024>

18. Geyh, M. and Schleicher, H., 1990. *Absolute Age Determination: Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Heidelberg, Springer Berlin. 503 p.

19. Pokrovsky, O., Schott, J. and Dupre, B., 2006. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, pp. 3239-3260. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.008>

20. Suturin, A., Paradina, L., Epov, V., Semenov, A., Lozhkin, V., Petrov, L., 2003. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. *Spectrochimica Acta Part B*, 58, pp.277-288. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X)

21. Timoshkin, O., Samsonov, D., Yamamuro, M., Moore, M., Belykh, O., Malnik, V., Sakirko, M., Shirokaya, A., Bondarenko, N., Domyseva, V., Fedorova, G., Kochetkov, A., Kuzmin, A., Lukhnev, A., Medvezhonkova, O., Nepokrytykh, A., Pasyukova, E., Poberezhnaya, A., Potapskaya, N., Rozhkova, N., Sheveleva, N., Tikhonova, I., Timoshkina, E., Tomberg, I., Volkova, E., Zaitseva, E., Zvereva, Yu., Kupchinsky, A. and Bukshuk, N., 2006. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger?. *Journal of Great Lakes Research*, 42, pp. 487-497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>

22. Ward, J., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American Statistical Association*, 58, pp. 236-244.

Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 08.11.2024; принята к публикации 12.11.2024.

The article was submitted 29.10.2024; approved after reviewing 08.11.2024; accepted for publication 12.11.2024.

**АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ**

Кадетов Н.Г.	
Урбанавичуте С.П.	
Гнеденко А.Е.	
Андрюшкевич Е.Н.....	6
Чижова В.П.	
Иванов А.Н.	
Канаев К.С.	
Сорокина Е.Г.....	13
Дзюба Е.А.....	20
Семакина А.В.....	42
Симонов В.Э.	
Леконцева Т.А.....	65
Чебыкин Е.П.	
Куликова Н.Н.	
Лихошвай Е.В.	
Сутурин А.Н.....	82

*Научное издание*

## **АНТРОПОГЕННАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ**

Том 10, № 2  
2024

Компьютерная верстка: С.Д. Мельникова  
Макет обложки: П.Ю. Санников

Подписано в печать 04.12.2024. Дата выхода: 09.12.2024  
Формат 60×84/8. Усл. печ. л. 12,09. Тираж 100 экз. Заказ 146

Редакция научного журнала «Антропогенная трансформация природной среды»  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15. ПГНИУ.  
Географический факультет, кафедра биогеоценологии и охраны природы  
Тел. (342) 239-64-87

Управление издательской деятельности  
Пермского государственного  
национального исследовательского университета.  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15  
Тел. (342) 239-66-36

Отпечатанов в типографии ПГНИУ  
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15  
Тел. (342) 239-65-47

*Распространяется бесплатно*